



**Tiago Miguel de
Almeida Codeço**

**Análise Tribológica de Materiais para Corrediças de
Moldes**



**Tiago Miguel de
Almeida Codeço**

**Análise Tribológica de Materiais para Corrediças de
Moldes**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais – 2º Ciclo, realizada sob a orientação científica do Dr. João António Labrincha Batista, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro e do Dr. João Miguel Maia Carrapichano, Professor Adjunto Equiparado do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

o júri

Presidente

Prof. Dr. Joaquim Manuel Vieira

professor catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. José Manuel Ramos Gomes

professor auxiliar da Universidade do Minho

Prof. Dr. João António Labrincha Batista

professor associado com agregação da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. João Miguel Maia Carrapichano

professor adjunto equiparado do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

agradecimentos

Neste trabalho agradeço ao Professor Doutor João António Labrincha Batista pela orientação e disponibilidade prestadas e ao Professor Doutor João Miguel Maia Carrapichano pela prestimosa ajuda na realização do mesmo. Agradeço também ao Engenheiro António Pinho da Simoldes Aços, S.A., pela orientação e acolhimento na Empresa e ainda à Dra. Flávia pela sua dedicada colaboração. Finalmente, à minha família e aos meus amigos.

palavras-chave

Tribologia, corredeiras, compatibilidade tribológica, propriedades mecânicas

resumo

As corredeiras ou chapas de deslize são componentes de moldes sujeitos à interação mecânica e tribológica com componentes de aço, designados por guias prismáticas. As corredeiras são componentes em bronze de alumínio ou bronze de alumínio grafitado. Devido à boa compatibilidade tribológica entre o bronze de alumínio e o aço, o seu uso tem grande relevância na indústria de moldes. No entanto o seu preço é elevado pelo que se procura encontrar um material alternativo. Com esse objectivo foram testados vários materiais: uma liga de zinco-alumínio, um metal duro, um ferro fundido cinzento e um latão de alta resistência, utilizando-se sempre o aço como contra-corpo.

Foram realizados ensaios tribológicos do tipo pino/placa, com vista a simular o deslizamento da corredeira na guia prismática. Primeiramente, analisou-se o comportamento tribológico do bronze de alumínio e do bronze de alumínio grafitado e posteriormente o ensaio com os outros materiais, para comparação. Os parâmetros de ensaio utilizados foram os seguintes: a velocidade de rotação situou-se entre 50-200 rpm, velocidade linear 0,055-0,220 m/s e carga normal aplicada 0,01-0,09 kN.

Os materiais ensaiados apresentaram um comportamento catastrófico, com coeficientes de atrito muito superiores ao calculado para os bronzes de alumínio.

No que respeita ao coeficiente de desgaste, verificou-se que o bronze de alumínio e a liga de zinco-alumínio apresentaram coeficientes de desgaste acima de $10^{-4} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$. O bronze de alumínio grafitado apresentou um coeficiente de desgaste de $\approx 10^{-5} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$, considerado moderado.

O bronze de alumínio grafitado apresentou o melhor desempenho tribológico.

keywords

Tribology, slides, tribological compatibility, mechanical properties

abstract

Slide plates are mold components that support mechanical and tribological interactions with steel components, called prismatic guides. The slides are components normally made in aluminum bronze or aluminum bronze with graphite. Due the good tribological compatibility between aluminum bronze and steel, their use is relevant in the mold industry. However, their cost is high and there is interest in search for alternative materials. In the actual work we tested: zinc-aluminum alloy, hard metal, grey cast iron, and high-strength brass, using always steel as counter - body.

Pin / plate type tribological tests were performed, attempting to simulate the sliding of the material in a prismatic guide. First, the tribological behavior of aluminum bronze and aluminium bronze with graphite were evaluated, and results were assumed as standard in the comparison with alternative materials. Testing parameters used were as follows: rotation speed = 50-200 rpm, linear velocity = $0.055\text{-}0.220\text{ ms}^{-1}$, and normal load = $0.01\text{-}0.09\text{ kN}$.

All the alternative materials showed a catastrophic behavior, with friction coefficients much higher than calculated for the aluminum bronzes.

As regards the wear coefficient, it was found that the aluminum bronze and zinc-aluminum alloy showed wear coefficients above $10^{-4}\text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$. The aluminum bronze with graphite showed a wear coefficient of $\approx 10^{-5}\text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$, which is considered moderate.

The aluminium bronze with graphite showed the best tribological performance.

ÍNDICE

Introdução.....	1
1. ELEMENTOS BIBLIOGRÁFICOS	3
1.1. FUNDAMENTOS	3
1.1.1. Tribologia	3
1.1.2. Atrito	4
1.1.3. Desgaste.....	8
1.1.4. Compatibilidade Tribológica.....	15
1.2. MATERIAIS UTILIZADOS PARA CORREDIÇAS	17
1.2.1. Bronze de Alumínio e Bronze de Alumínio Grafitado	17
1.2.2. Liga de Zinco-Alumínio	19
1.2.3. Metal Duro.....	21
1.2.4. Ferro Fundido Cinzento.....	22
1.2.5. Latão de Alta Resistência.....	23
1.3. AÇO.....	24
1.3.1. Classificação dos Aços	26
1.3.1.1. Sistema Americano (AISI / SAE)	26
1.3.1.2. Sistema Alemão (DIN).....	26
1.3.2. Exemplos de Classificação de Aços	26
1.3.3. Outros Critérios de Classificação dos Aços	27
2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	29
2.1. MOLDE INDUSTRIAL PADRÃO, GUIAS E CORREDIÇAS.....	29
2.2. MATERIAIS COMERCIAIS SELECIONADOS PARA OS ENSAIOS TRIBOLÓGICOS	30
2.2.1. Bronze de Alumínio	30
2.2.2. Bronze de Alumínio Grafitado.....	31
2.2.3. Liga de Zinco-Alumínio	32
2.2.4. Metal Duro e Ferro Fundido Cinzento.....	32
2.2.5. Latão de Alta Resistência.....	33
2.2.6. Aço	33
2.3. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS DE CARACTERIZAÇÃO E DE ENSAIO.....	34
2.3.1. Microscopia SEM/EDS.....	34
2.3.2. Topografia Superficial - Rugosidade.....	34
2.4. CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA – ENSAIOS PINO/PLACA.....	35
2.4.1. Preparação das Faces dos Materiais Comerciais	35
2.4.2. Equipamento, Procedimento e Parâmetros dos Ensaio Pino/Placa.....	35
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
3.1. DETERMINAÇÃO DO CÁLCULO TEÓRICO DA PRESSÃO APLICADA NAS CORREDIÇAS E VELOCIDADE DE DESLIZAMENTO	41

3.2. ESTIMATIVA DA FORÇA APLICADA PELO PINO PARA SIMULAÇÃO DA PRESSÃO APLICADA NAS CORREDIÇAS.....	42
3.3. CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS PARA ENSAIOS TRIBOLÓGICOS PINO/PLACA	42
3.4. COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO EM ENSAIOS PINO/PLACA	43
3.4.1. Par Tribológico Aço/AMPCO 18 (Rectificado sem Polimento)	43
3.4.2. Par Tribológico Aço/AMPCO 18 (Rectificado com Polimento)	48
3.4.3. Par Tribológico Aço/AMPCO 608 Grafitado.....	57
3.4.4. Par Tribológico Aço/ZA-27	67
3.4.5. Par Tribológico Aço/Metal Duro (WC-Co)	79
3.4.6. Par Tribológico Aço/Ferro Fundido Cinzento (FFC).....	81
3.4.7. Par Tribológico Aço/Latão de Alta Resistência	84
3.4.8. Comparação Entre os Diferentes Tipos de Materiais Constituintes dos Pares Tribológicos Ensaiaados	86
4. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	89

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS:

d_t - densidade teórica
 F_a - força de atrito
 H - dureza
 K_d - coeficiente de desgaste
 L - distância percorrida em deslizamento ou comprimento
 m_f - massa final
 m_i - massa inicial
 n_r - número de rotações
 N - carga normal
 r_d - raio da pista de desgaste
 R_A - rugosidade média
 R_z - altura a 10 pontos
 $R_{máx}$ - rugosidade máxima
 t - tempo
 V - velocidade de deslizamento
 V_d - volume de desgaste
 w - velocidade de rotação
 \varnothing - diâmetro
 \varnothing_{ext} - diâmetro externo
 \varnothing_{int} - diâmetro interno
 μ_e - coeficiente de atrito estático
 μ - coeficiente de atrito cinético ou dinâmico

ABREVIATURAS

EDS - microanálise qualitativa por dispersão de energias
FFC - ferro fundido cinzento (de grafite lamelar)
PA - alto grau de pureza
SEM - microscopia electrónica de varrimento
(%) - percentagem em peso
(% vol.) - percentagem em volume

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Descrição gráfica da interacção da tribologia com outros domínios	4
Figura 1.2: Distribuição do coeficiente de desgaste para materiais metálicos em contacto de deslizamento, sujeito a diferentes condições de lubrificação	14
Figura 1.3: Mapa de compatibilidade para seleccionar combinações de metais, derivado de diagramas de equilíbrio binários.....	16
Figura 2.1: Modelo 3D do molde 7191.....	29
Figura 2.2: Modelo 3D do molde 7191 em posição de injeção.	30
Figura 2.3: Vista real do molde 7191 em ciclo de injeção.	30
Figura 2.4: Vista geral do tribómetro.....	36
Figura 2.5: Aspecto da zona de trabalho do tribómetro.....	37
Figura 2.6: Modelo 3D do ensaio pino/placa.	38
Figura 3.1: Pino e placa AMPCO 18 rectificada e não polida após ensaio pino/placa.....	44
Figura 3.2: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento - Aço/AMPCO 18 (rectificado sem polimento).....	45
Figura 3.3: Atrito médio em função da distância de deslizamento - Aço/AMPCO 18 (rectificado sem polimento).....	46
Figura 3.4: Fotomicrografia de SEM da zona fora da pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado sem polimento).....	47
Figura 3.5: Fotomicrografia de SEM da a) pista de trabalho e b) pista de trabalho com maior ampliação para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado sem polimento).....	47
Figura 3.6: Placa de AMPCO 18 (rectificada e polida) e contra pino de aço após ensaio tribológico.	48
Figura 3.7: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).	52
Figura 3.8: Atrito médio em função da distância de deslizamento para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).	52

Figura 3.9: Fotomicrografias de SEM da a) zona fora da pista de trabalho e b) uma sua maior ampliação para a placa AMPCO 18 (rectificada e polida).....	53
Figura 3.10: Fotomicrografia de SEM da zona da pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).	54
Figura 3.11: Fotomicrografias de SEM da zona a) mais e b) menos polida da pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).	54
Figura 3.12: Fotomicrografia de SEM da face do pino para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).	55
Figura 3.13: Fotomicrografias de SEM da a) zona central do pino e b) orla exterior do pino para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).....	56
Figura 3.14: Espectro de EDS da zona central do pino para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).	56
Figura 3.15: Espectro de EDS da zona periférica do pino para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).	57
Figura 3.16: Placa AMPCO 608 grafitado e contra pino de aço após ensaio tribológico....	58
Figura 3.17: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.....	60
Figura 3.18: Atrito médio em função da distância de deslizamento para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.....	61
Figura 3.19: Fotomicrografias de SEM da a) zona fora da pista de trabalho e b) uma sua maior ampliação para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.....	61
Figura 3.20: Fotomicrografias de SEM da a) zona interior da pista de trabalho e b) uma sua maior ampliação para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.....	62
Figura 3.21: Fotomicrografias de SEM da a) zona da interface metal/grafite e b) zona interior da grafite para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.	62
Figura 3.22: Espectro de EDS da zona metálica “pré-grafite” na pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.....	63
Figura 3.23: Espectro de EDS da zona da grafite na pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.....	63
Figura 3.24: Espectro de EDS da zona metálica “pós-grafite” na pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.....	64
Figura 3.25: Fotomicrografias de SEM da a) interface grafite/metal e b) sua maior ampliação para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.....	65

Figura 3.26: Fotomicrografias de SEM da a) vista parcial do pino e b) zona afastada do centro do pino com ampliação para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.....	65
Figura 3.27: Espectro de EDS da face do pino para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.....	66
Figura 3.28: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.....	67
Figura 3.29: Placa ZA-27 e contra pino de aço após ensaio tribológico.	68
Figura 3.30: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/ZA-27.....	70
Figura 3.31: Atrito médio em função da distância de deslizamento para o par Aço/ZA-27.	70
Figura 3.32: Fotomicrografias de SEM da a) zona fora da pista de trabalho e b) uma sua maior ampliação para o par Aço/ZA-27.....	71
Figura 3.33: Fotomicrografias de SEM da a) pista de trabalho e b) c) zonas de pormenor da pista de trabalho a maiores ampliações para o par Aço/ZA-27.....	71
Figura 3.34: Espectro de EDS da zona da pista de desgaste para o par Aço/ZA-27.	72
Figura 3.35: Espectro de EDS das partículas de desgaste para o par Aço/ZA-27.....	73
Figura 3.36: Fotomicrografia de SEM da vista geral (e 5 zonas) da face do pino para o par Aço/ZA-27.....	73
Figura 3.37: Fotomicrografia de SEM referente à zona 1 da face do pino para o par Aço/ZA-27.....	74
Figura 3.38: Espectro de EDS da zona 1 da face do pino para o par Aço/ZA-27.	75
Figura 3.39: Fotomicrografia de SEM referente à zona 2 da face do pino para o par Aço/ZA-27.....	75
Figura 3.40: Espectro de EDS da zona 2 da face do pino para o par Aço/ZA-27.....	76
Figura 3.41: Fotomicrografias de SEM a) da zona 3 e b) da zona 4 da face do pino para o par Aço/ZA-27.....	76
Figura 3.42: Espectro de EDS da zona 3 da face do pino para o par Aço/ZA-27.	77
Figura 3.43: Fotomicrografia de SEM da zona 5 da face do pino para o par Aço/ZA-27...78	78
Figura 3.44: Espectro de EDS da zona 5 da face do pino para o par Aço/ZA-27.	78
Figura 3.45: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/Metal Duro.....	81
Figura 3.46: Atrito médio em função da distância de deslizamento para o par Aço/Metal Duro.	81

Figura 3.47: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/FFC.....	83
Figura 3.48: Atrito médio em função da distância de deslizamento para o par Aço/FFC. ..	83
Figura 3.49: Placa de latão e contra pino de aço após ensaio tribológico.....	84
Figura 3.50: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/Latão de alta resistência.....	85
Figura 3.51: Evolução comparativa do coeficiente de atrito instantâneo entre os vários materiais testados.....	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Valores de coeficiente de atrito para várias ligas contra aço (0,13% C, 3,4% Ni), em superfícies limpas e sem lubrificação, expostas ao meio ambiente	6
Tabela 1.2: Composição de bronzes para fundição	18
Tabela 1.3: Composição de latões segundo a norma UNS	24
Tabela 1.4: Teores limite para a classificação dos aços como não ligados, conforme a Euronorma EN 10020 de 1989	28
Tabela 2.1: Composição e propriedades do AMPCO 18	31
Tabela 2.2: Composição e propriedades do AMPCO 608	31
Tabela 2.3: Composição e propriedades da liga ZA-27	32
Tabela 2.4: Composição e características das amostras de metal duro e de ferro fundido cinzento	32
Tabela 2.5: Composição e propriedades do latão Universal 255	33
Tabela 2.6: Composição e propriedades do aço 2738	33
Tabela 3.1: Valores de rugosidade na guia prismática e corredeira	43
Tabela 3.2: Valores de rugosidade nas amostras para ensaio pino/placa	43
Tabela 3.3: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/AMPCO 18 (rectificado sem polimento)	44
Tabela 3.4: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido)	49
Tabela 3.5: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/AMPCO 608 grafitado.	60
Tabela 3.6: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/ZA-27	69
Tabela 3.7: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/Metal Duro.	80
Tabela 3.8: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/FFC.	82
Tabela 3.9: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/Latão de Alta Resistência	84

Tabela 3.10. Resultados dos ensaios tribológicos pino/placa efectuados com os diferentes materiais, em contacto de deslizamento seco, contra aço.	86
--	----

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1.1: Coeficiente de Atrito	4
Equação 1.2: Taxa de Desgaste	13
Equação 1.3: Coeficiente de Desgaste	14
Equação 2.1: Rugosidade média.....	34
Equação 2.2: Volume de desgaste	39
Equação 2.3: Velocidade de deslizamento	39
Equação 2.4: Raio da pista de desgaste.....	40
Equação 2.5: Distância percorrida em deslizamento	40
Equação 2.6: Tempo de ensaio	40

INTRODUÇÃO

O presente trabalho, enquadrado no Mestrado em Engenharia de Materiais, do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro, envolveu um estágio na Empresa Simoldes Aços S.A., sediada em Oliveira de Azeméis.

A Simoldes Aços, fundada em 30 de Novembro de 1959, é uma empresa que se dedica à concepção e fabrico de moldes para injeção de termoplásticos, tendo iniciado a sua actividade no fabrico de pequenos moldes para artigos domésticos e brinquedos. Hoje em dia, possui capacidade para construir moldes até 25 toneladas, tem 210 colaboradores e uma facturação anual de 18 milhões de euros, actuando principalmente no sector automóvel, exportando moldes para França, Alemanha, Espanha, Inglaterra, Escandinávia, Turquia, China e Irão. O *know-how* acumulado em várias tecnologias de moldação, como as de injeção 2K, injeção assistida por gás, injeção híbrida e injeção a baixa pressão, associadas a uma fabricação de elevada qualidade dos moldes, têm contribuído para a sua liderança na Indústria Europeia do sector. A Simoldes Aços está certificada pela norma ISO 9001:2000.¹

Como objectivo do estágio, a empresa propôs a tentativa de substituição de um componente dos moldes em bronze de alumínio, por um material que permitisse o mesmo desempenho mas que possuísse um menor custo. O componente do molde em estudo é designado por corredeira. As corredeiras ou chapas de deslize, têm como principal função centrar o acoplamento das duas partes dos moldes (cavidade e macho), quer no momento do fecho quer na abertura do molde, suportando o esforço mecânico desenvolvido nas guias prismáticas. Nestas guias ocorre uma acção de deslizamento das corredeiras de bronze contra superfícies de aço, funcionamento possível por adequado comportamento tribológico intrínseco destes materiais, sobretudo nesta combinação mútua.

Para além das elevadas cargas a que as corredeiras estão sujeitas, o baixo atrito e reduzido desgaste serão factores essenciais no bom desempenho mecânico do molde. Portanto, uma alternativa de material para aquele componente passará pelo estudo das propriedades e comportamento mecânico e tribológico.

Com este trabalho pretende-se, primeiramente, analisar o comportamento tribológico do bronze de alumínio e do bronze de alumínio grafitado. Posteriormente, como possíveis alternativas, foram testados os seguintes materiais comerciais: uma liga de zinco-alumínio, um metal duro, um ferro fundido cinzento e um latão de alta resistência. No estudo realizado,

foi sempre utilizado o aço como contra-corpo, de forma a simular o movimento das corredeiras a deslizar na guia prismática, no momento do fecho e abertura do molde, na perspectiva de apenas se apresentar alternativas para o material da corredeira.

Os ensaios tribológicos do tipo pino/placa foram realizados no laboratório de tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, num tribómetro universal controlado por microprocessador, Plint & Partners TE92.

Para cada par foram realizadas medidas do coeficiente de atrito, foi quantificado o coeficiente de desgaste, e estudado o comportamento mecânico e tribológico pela inter-relação com a análise morfológica das superfícies iniciais de trabalho e pós-ensaios. Também foi avaliada a formação e natureza de terceiro corpo e seu efeito no atrito e desgaste, e eventuais efeitos de auto-lubrificação, sobretudo no caso do bronze grafitado pela acção da lubrificação sólida conferida pela grafite.

Nos ensaios tribológicos do tipo pino/placa, com excepção do par tribológico aço/AMPCO 608 grafitado, com combinação excepcional em auto-lubrificação, a carga imposta pelo pino nunca se aproximou do valor calculado teoricamente numa situação real, para os pares ensaiados, devido à impossibilidade de funcionamento estável. Uma das impossibilidades para tal prende-se com o facto do ensaio ser realizado a seco, sem lubrificação. A utilização de lubrificação e o estudo dos seus regimes poderão ser objecto de futuros trabalhos.

1. ELEMENTOS BIBLIOGRÁFICOS

1.1. Fundamentos

1.1.1. Tribologia

A palavra Tribologia deriva das palavras grega TRIBOS que significa atrito, e LOGOS que significa estudo, de forma que uma tradução literal significa “Estudo do Atrito”, ou a ciência que estuda o atrito. Tribologia é definida como “A ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas”.²

O estudo dos fenómenos de atrito e desgaste dos materiais, bem como da lubrificação como forma de os controlar, constitui uma preocupação de investigadores e tecnólogos desde longa data. Os continuados avanços tecnológicos criaram novos desafios no domínio da tribologia, e também novas áreas de intervenção. Desenvolvem-se novos materiais e revestimentos capazes de suportar pressões de contacto e temperaturas cada vez mais elevadas, fomentam-se reduções do atrito e do desgaste, procuram-se lubrificantes mais eficazes produzindo menos danos ambientais, ou promove-se mesmo a sua eliminação, sem diminuição do desempenho dos mecanismos, aprofunda-se a compreensão dos fenómenos tribológicos do contacto, já não apenas à micro-escala, mas também à nano-escala. Do lado das aplicações industriais, a tribologia tem uma importância decisiva no domínio do projecto e manutenção de componentes e equipamentos mecânicos, e dos processos de manufactura.³

Face à tentativa de busca do melhor desempenho das aplicações com interacção mecânica, é de grande relevância efectuar estudos de atrito e desgaste nos materiais para tais aplicações, com a obtenção de materiais tribologicamente compatíveis, isto é, pares com baixos coeficientes de atrito e de desgaste e aos quais estejam associadas boas propriedades mecânicas, estas por si só já benéficas na resistência ao desgaste.

No esquema da figura 1.1 são descritas as interacções entre a tribologia e outras ciências ou domínios aí referidos.

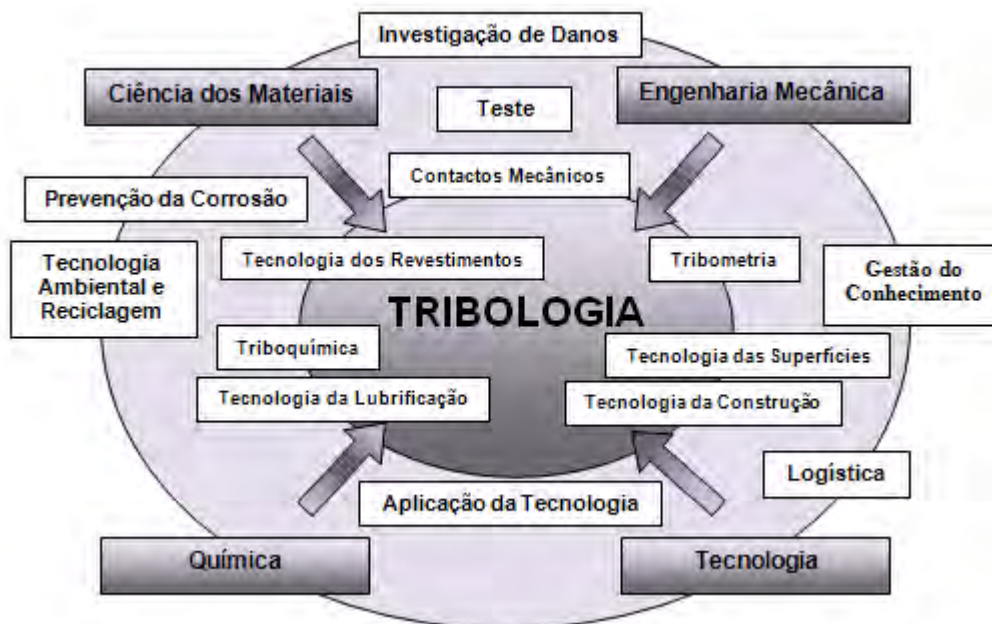


Figura 1.1: Descrição gráfica da interação da tribologia com outros domínios. ⁴

1.1.2. Atrito

O atrito pode ser designado como a resistência ao movimento relativo entre corpos em escorregamento ou rolamento, gerando dissipação de energia. ⁵

O atrito elevado é desejável entre os pneus e as estradas (coeficientes que variam de 0,5 a 1,2), entre componentes mecânicos que são aparafusados, e outros exemplos diversos. Por sua vez, o atrito baixo é desejável no deslizamento de componentes do disco rígido do computador, em motores, em fechaduras e em muitos outros dispositivos mecânicos. ⁶

Pela primeira lei do atrito, o coeficiente de atrito, μ , é a razão entre as componentes tangencial (força de atrito) e normal dos esforços exercidos numa acção de contacto: ⁵

$$\mu = \frac{F_a}{N} \quad \text{Equação 1.1}$$

onde μ é o coeficiente de atrito, F_a , a força de atrito e N a força normal.

As três leis empíricas básicas do atrito são conhecidas há séculos, desde os trabalhos de Leonardo da Vinci (1452-1519), de Amontom (1699) e Coulomb (1781), sendo enunciadas como: ^{6,7}

- A força de atrito tangencial é proporcional à força normal em deslizamento;

- A força de atrito é independente da área de contacto aparente;
- A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

Nas últimas décadas, a terceira lei tem sido fortemente colocada em causa.

A proporcionalidade entre a força de atrito e a carga normal levou à definição dos coeficientes de atrito estático e cinético. Coulomb observou que a força para manter um corpo em movimento era menor do que aquela necessária para iniciá-lo.⁸ Assim, o coeficiente de atrito estático, μ_e , existe na iminência do movimento, no contacto entre duas superfícies, enquanto que em movimento, designa-se por coeficiente de atrito cinético (ou dinâmico), μ .

Contudo, os coeficientes de atrito são dependentes de parâmetros como a temperatura e velocidade de deslizamento e, em alguns momentos, não existe proporcionalidade directa entre a força de atrito e a carga normal. Ainda, muitas características do atrito são o resultado das propriedades de rugosidade das superfícies em contacto.⁹

É de aceitação geral que o atrito resulta de interacções complexas entre superfícies em contacto, que incluem os efeitos de deformação das asperidades da superfície, deformação plástica do material macio por asperidades das superfícies duras ou partículas de desgaste e interacção molecular levando à adesão nos pontos reais de contacto. Um número de factores, tais como as propriedades mecânicas e físico-químicas dos materiais em contacto, a topografia superficial e o ambiente, determinam a importância relativa de cada um no processo de atrito.⁷

Existem três fenómenos dominantes que controlam o atrito em superfícies sem lubrificação: a área real de contacto; as tensões de corte nas junções adesivas formadas nos pontos de contacto reais; a maneira como essas junções sofrem ruptura durante o movimento relativo.⁷

O atrito está sempre associado a uma dissipação de energia, e na sequência disso, estágios podem ser identificados no processo, levando a perdas de energia.⁷

Estágio 1. A energia mecânica é introduzida na zona de contacto, resultando na formação da área real de contacto.

Estágio 2. A energia mecânica é transformada dentro da área real de contacto, sobretudo através da deformação elástica e histerese, deformação plástica, e arrancamento, com adesão partilhada às faces oponentes, só a uma ou a nenhuma, com a formação de um resíduo de desgaste solto, por vezes dito de terceiro corpo.

Estágio 3. A dissipação de energia mecânica manifesta-se principalmente através de: dissipação térmica (calor), armazenamento dentro do material (criação de defeitos, fissuras, tensões geradas, transformações plásticas) e emissão (acústica, térmica).

A análise do contacto entre duas superfícies em movimento relativo deve ser feita, levando em consideração o facto de as superfícies possuírem asperidades com altura e distribuição aleatória, que se deformam elástica ou plasticamente com a aplicação de carga normal. A soma das áreas de todos os micro-contactos criados por asperidades individuais constituem a área real de contacto, que é uma mínima fracção da área de contacto geométrica aparente. A deformação dos materiais em contacto e as características da topografia superficial (rugosidade), definem a área real de contacto, quando sujeitos a uma carga normal aplicada. ⁷

A rugosidade também influencia o atrito, existindo um valor intermédio de rugosidade para o qual o atrito é mínimo. Se as superfícies de trabalho forem muito lisas, a adesão torna-se elevada, aumentando o coeficiente de atrito. Se forem muito grosseiras, verifica-se maior atrito devido à deformação plástica das asperidades. ⁹

Para o coeficiente de atrito entre materiais metálicos, a maioria dos dados fornecidos é baseada em experiências entre um corpo deslizante curvo e uma superfície plana com cargas da ordem de 1-10 N e velocidades de deslizamento da ordem de poucos milímetros por segundo, ¹⁰ como é o caso da tabela 1.1.

Tabela 1.1: Valores de coeficiente de atrito para várias ligas contra aço (0,13% C, 3,4% Ni), em superfícies limpas e sem lubrificação, expostas ao meio ambiente. ¹⁰

Ligas	Coeficiente de Atrito, μ
Liga Cobre-Chumbo	0,2
Com Metal (Base de Estanho)	0,8
Com Metal (Base de Chumbo)	0,5
Bronze Fosforoso	0,3
Latão (Cu 70, Zn 30)	0,5
Constantan	0,4
Aço (0.13% C, 3.42% Ni)	0,8
Ferro Fundido	0,4

Cargas moderadas e velocidades de deslizamento baixas têm sido utilizadas para evitar a complicação dos efeitos do calor gerado por atrito. Isto torna mais fácil interpretar o comportamento de atrito em termos das propriedades dos materiais. Com velocidades de deslizamento elevadas, como é usual em termos práticos de engenharia, a temperatura interfacial pode amaciar ou até mesmo fundir as camadas superficiais dos materiais, afectando profundamente o atrito.¹⁰

O fenómeno do atrito pode ser explicado através de várias teorias, que se apresentam, de seguida, em forma resumida.

- Teoria da adesão - esta teoria é uma das mais importantes no processo do atrito, que tem origem a partir da formação e ruptura das ligações adesivas inter-faciais.⁷ O contacto inicial entre as superfícies de trabalho inicia-se nos picos das asperidades, que constituem uma pequena fracção de área aparente de contacto. A carga é suportada por esta pequena fracção de asperidades em contacto.^{7,8,11,12,13,14} O efeito da carga provoca altas pressões que originam deformação plástica e aumento proporcional da área real de contacto. A adesão nos contactos ocorre por via de forças interatómicas e intermoleculares. A rotura dos contactos dá-se por aumento da força tangencial.^{8,10}
- Teoria da deformação plástica – manifesta-se quando duas superfícies em contacto possuem durezas diferentes. As asperidades da superfície mais dura vão penetrar na superfície macia da outra, produzindo a abertura de sulcos no material macio por deformação plástica, aquando do movimento relativo. Por causa disto, uma determinada força é requerida de modo a manter o movimento. Esta força pode constituir a maior componente da força de atrito observada.⁷
- Teoria do crescimento da junção – esta teoria admite que pela acção da força normal, a junção sofre deformação até atingir uma situação de equilíbrio. Ao ser aplicada uma força tangencial, ocorre movimento tangencial na junção, que tem o efeito de aumentar a área de contacto por deformação plástica, mantendo a situação de equilíbrio, na nova condição. Este aumento de área pode ir de três a quatro vezes acima do seu valor inicial e faz diminuir a tensão normal. Se a força tangencial e normal crescerem continuamente, o correspondente aumento de área pode não ser suficiente para manter o equilíbrio, e ocorre a ruptura da junção.⁸

1.1.3. Desgaste

O desgaste é geralmente associado à perda de material que ocorre na superfície de um componente como resultado do movimento relativo a um componente adjacente.^{7,8} O desgaste pode originar perda de funcionalidade do componente e, em muitas situações, falha catastrófica.¹⁵

O desgaste também pode ser definido como a indesejável e cumulativa mudança de dimensões provocada pela remoção gradual de partículas da superfície em contacto e com movimento relativo, devido, predominantemente, a acções mecânicas e/ou químicas.⁸

Quase todas as máquinas perdem a sua durabilidade e fiabilidade devido ao desgaste, por isso, o entendimento do processo de desgaste bem como os seus mecanismos e o seu controlo, é de importância crucial para a sua minimização.¹⁵

O desgaste é controlado pelas propriedades do material, pelo ambiente, pelas condições de trabalho e pela geometria dos corpos em contacto.⁷

Em praticamente todas as situações, é possível identificar o mecanismo de desgaste dominante, o qual é geralmente determinado pelas propriedades mecânicas e estabilidade química dos materiais, pela temperatura na zona de contacto e condições de trabalho.⁷

O desgaste é o resultado da remoção de material por separação física de átomos devido à micro-fractura, por dissolução química, ou por fusão na interface de contacto. O modo de desgaste dominante pode variar de um para outro por razões que incluem mudanças nas propriedades da superfície do material e respostas da dinâmica da superfície causadas pelo calor gerado por atrito, formação de filmes químicos e desgaste.¹⁶

O desgaste pode ser investigado do ponto de vista do tipo de contacto entre as superfícies sólidas. Existem muitas configurações diferentes de contacto na prática. As configurações de desgaste poderão ser do tipo contínuo, recíproco ou cíclico, desgaste por segundo corpo, desgaste a três corpos e erosão.

Os quatro mecanismos de desgaste fundamentais e principais são: adesivo, abrasivo, por fadiga, corrosivo e oxidativo.

1. Desgaste por Adesão – o desgaste adesivo é uma forma muito grave de desgaste, caracterizado por taxas de desgaste elevadas e uma grande instabilidade do coeficiente de atrito. Os contactos existentes em deslizamento podem ser rapidamente destruídos por desgaste adesivo e, em casos extremos, o movimento de deslizamento pode ser impedido por elevados valores do coeficiente de atrito, ou por gripagem.⁹

A maioria das falhas de lubrificação no contacto de metais em deslizamento resulta em desgaste adesivo, uma vez que a função básica do lubrificante é fornecer algum grau de separação entre as superfícies em deslizamento. Se as superfícies não estiverem separadas, a adesão e consequentemente o desgaste são praticamente inevitáveis.⁹

O desgaste adesivo está invariavelmente associado à formação de junções adesivas na interface de contacto. Para uma junção ser formada, as superfícies que interagem devem estar em contacto íntimo. A resistência das junções depende em grande medida da natureza físico-química das superfícies em contacto.⁷

Numa interface entre duas superfícies sob contacto plástico que possua insuficiente resistência à ligação adesiva, gerando-se oposição ao deslizamento relativo, resulta um fenómeno adesivo com deformação plástica na região de contacto, iniciando-se uma fissura que se propaga e que está sujeita a tracção e corte. Quando a fissura atinge a interface de contacto, forma-se uma partícula de desgaste com conclusão da transferência adesiva.¹⁶ As várias etapas consecutivas de formação de partículas de desgaste adesivo são identificadas em alguma literatura como as seguintes:⁷

- Deformação das asperidades em contacto;
- Remoção de filmes da superfície;
- Formação da junção adesiva;
- Falha das junções e transferência de material;
- Modificação dos fragmentos transferidos;
- Remoção dos fragmentos transferidos e criação de partículas de desgaste soltas.

Apesar do mecanismo de falha das junções adesivas não estar bem definido, o desgaste adesivo é influenciado pelos seguintes parâmetros, caracterizando os corpos em contacto: estrutura electrónica, estrutura cristalina, orientação cristalográfica e resistência coesiva. Por exemplo, metais com estrutura hexagonal, em geral, são mais resistentes ao desgaste adesivo do que metais com estrutura cúbica de corpo centrado e de faces centradas. Elevada dureza, elevado módulo de elasticidade e energia superficial do metal também diminuem o fenómeno da adesão.⁷

A probabilidade de formação de partículas de desgaste devido aos contactos entre as asperidades no desgaste adesivo é maior comparativamente àquela produzida, por exemplo, no desgaste abrasivo. O desgaste rápido provocado por este tipo de desgaste é, por isso, alvo de controlo e minimização.⁷

Camadas contaminadas de óxidos superficiais e impurezas contribuem para a redução do desgaste adesivo. O uso de lubrificantes especiais e uma cuidadosa selecção de materiais também reduzem o desgaste adesivo, devendo ser evitados materiais idênticos no deslizamento.⁷

2. Desgaste por Abrasão – o desgaste abrasivo é muito comum, e ao mesmo tempo, um tipo de desgaste muito sério.⁷ Ocorre quando duas superfícies interagem, estando em contacto físico directo, e uma delas possui uma dureza significativamente superior à outra.^{7,16} Sob a acção da carga normal, as asperidades da superfície dura penetram na superfície macia, produzindo, deste modo, deformações plásticas. Quando um movimento tangencial é introduzido, o material é removido da superfície macia pela acção combinada de micro-sulcagem e micro-corte.⁷

Existem dois modos básicos de desgaste abrasivo: abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos. Abrasão a dois corpos define-se quando as asperidades duras passam sobre uma superfície como uma ferramenta de corte. No caso de abrasão a três corpos, as partículas de desgaste encontram-se livres para rolar e deslizar sobre a superfície, provocando desgaste abrasivo.⁹

No caso de desgaste abrasivo, há uma relação próxima entre as propriedades dos materiais e a resistência ao desgaste. Existe uma proporcionalidade directa entre a resistência ao desgaste relativa e a dureza, no caso de metais puros e ligas, no estado recozido. É, pois reconhecido, que materiais duros atingem taxas de desgaste menores do que materiais macios.⁷

O tratamento térmico de aços normalmente aumenta a sua resistência ao desgaste abrasivo. No caso de materiais duros não metálicos, também existe uma relação directa entre a resistência à abrasão e a dureza.⁷

A capacidade de um material resistir ao desgaste abrasivo é influenciada pela ductilidade, distribuição de tensões, anisotropia cristalina e estabilidade mecânica.⁷

O desgaste abrasivo é a forma mais rápida de desgaste, com custos elevados para a indústria, havendo necessidade de minimizá-los. O método básico de controlo do desgaste abrasivo é aumentar a dureza da superfície desgastada até certo grau, dado que o aumento da dureza pode trazer complicações ao nível da fragilidade associada. Outra maneira de suprimir o desgaste abrasivo é a utilização de um material duro ou de um revestimento duro. Os revestimentos superficiais duros são cada vez mais utilizados como um meio de combater o desgaste abrasivo. As camadas finas de

revestimento podem ser depositadas em qualquer componente de aço e esta opção permite economizar na utilização de materiais caros.⁹

Existem outras duas formas de desgaste associadas ao desgaste abrasivo: desgaste por erosão ou por cavitação. O desgaste erosivo é causado pelo impacto de partículas sólidas ou líquidas contra uma superfície sólida. O desgaste por cavitação é causado pelo impacto localizado de um fluido contra uma superfície durante a formação de bolhas.⁹

Apesar das três formas de desgaste partilharem características em comum, existem diferenças fundamentais. Por exemplo, a partícula de líquido pode causar erosão, mas não pode abradir. Os factores que influenciam o desgaste por erosão são a composição, forma e dureza da partícula, o ângulo de incidência, temperatura, a velocidade de impacto e o tamanho da partícula. Um exemplo de desgaste erosivo acontece nas lâminas das turbinas de um avião, quando voa através de nuvens de poeiras.⁹

No desgaste por cavitação, a formação de bolhas é causada pela libertação de gás dissolvido a partir de um líquido que se encontra a pressões negativas. As hélices de um navio, pás de turbina a vapor são exemplos de situações em que se verifica cavitação.⁹

3. Desgaste por Fadiga – em muitos contactos bem lubrificados a adesão entre duas superfícies é desprezável, embora haja uma significativa taxa de desgaste. Este desgaste é causado por deformações mantidas pelas asperidades e camadas superficiais, quando as asperidades das superfícies oponentes fazem contacto.⁹ Os contactos entre as asperidades das superfícies, sujeitos a tensões locais elevadas e repetidas por um determinado número de ciclos no decorrer de deslizamento ou movimento cíclico, originam partículas de desgaste obtidas pela propagação de fissuras por fadiga.^{7,16,9} O desgaste, nestas condições, é determinado pelos mecanismos de iniciação, crescimento e fractura das fissuras. As superfícies desgastadas contêm elevados níveis de tensão comparadas com as não desgastadas. Esta tensão existente e consequente modificação da microestrutura do material têm um forte efeito no processo de desgaste. O método mais eficaz de prevenir o desgaste por fadiga é diminuir o coeficiente de atrito entre dois corpos em contacto, de modo a que as forças de tracção na superfície sejam insuficientes para que a delaminação ocorra em deslizamento ou contacto por fadiga em rolamento. A limpeza dos materiais em

contacto, as imperfeições ou inclusões mínimas, reduzem o desgaste por fadiga. O aumento da dureza, reduzindo o crescimento da fissura, pode ser benéfico em alguns casos.⁹

4. Desgaste Corrosivo e Oxidativo – este tipo de desgaste ocorre em diversas situações, com lubrificação e na ausência dela.⁹ A causa fundamental destas duas formas de desgaste é a reacção química ou electroquímica entre a superfície desgastada e um meio corrosivo que pode ser um reagente químico, um lubrificante reactivo ou mesmo o ar.^{7,9,16} O desgaste corrosivo é um termo geral relativo a uma forma de desgaste, dependente de um processo químico ou corrosivo e o desgaste oxidativo refere-se ao desgaste provocado pelo oxigénio atmosférico. Ambas as formas de desgaste partilham em comum uma característica em que a rápida taxa de desgaste é acompanhada pela diminuição do coeficiente de atrito.⁹

No desgaste corrosivo, as reacções químicas da superfície, benéficas para a prevenção do desgaste adesivo, se não forem controladas, levam a uma considerável perda de material subjacente. Se o material (metal) for corroído, produzindo-se um filme na sua superfície e, simultaneamente sujeito ao contacto por deslizamento, um dos quatro processos seguintes pode ocorrer:⁹

- i. Um filme lubrificante durável pode ser formado, inibindo a corrosão e o desgaste;
- ii. Um filme frágil, com tempo de vida curto e em contacto de deslizamento, pode ser formado e uma elevada taxa de desgaste pode ocorrer durante a formação e destruição dos filmes. O coeficiente de atrito pode ser baixo ou não, durante esse instante;
- iii. Os filmes de protecção da superfície podem ser desgastados (ex. corrosão localizada), e um par galvânico entre os filmes remanescentes e o substrato adjacente pode resultar na corrosão rápida da área desgastada na superfície;
- iv. Os processos corrosivos e de desgaste podem actuar independentemente causando a perda de material, que é dada pelo somatório dos dois processos.

O desgaste oxidativo é o desgaste de metais não lubrificados, na presença de ar ou oxigénio. O oxigénio altera radicalmente os coeficientes de atrito e as taxas de desgaste de metais em deslizamento a seco, existindo diversos mecanismos envolvidos no processo. O desgaste oxidativo foi observado quando ocorreram mudanças na composição química de resíduos de desgaste provocados por deslizamento a seco de

aços sob diferentes níveis de carga e velocidade de deslizamento. Quando a carga aplicada e a velocidade de deslizamento foram suficientes para aumentar a temperatura na zona de contacto em algumas centenas de graus Celsius, os resíduos de desgaste mudaram de ferro metálico para óxidos de ferro. As características do desgaste oxidativo são superfícies de desgaste lisas e pequenos resíduos de desgaste oxidados.⁹ A adição de inibidores de corrosão ao óleo lubrificante ou ao fluido pode ser um meio efectivo de controlo do desgaste corrosivo. Contudo, em sistemas lubrificados, existe um enorme risco de interferência com os aditivos da lubrificação, e os inibidores de corrosão poderão ser imprudentes. Os inibidores de corrosão podem funcionar pela adsorção ou formação de uma camada passivante nas superfícies de trabalho.⁹

Uma vez que a maioria das formas de desgaste corrosivo envolve reacções electroquímicas, a redução do desgaste pode ser conseguida pela imposição de um potencial catódico na superfície de desgaste.⁹

Quanto ao desgaste oxidativo, dado ser uma forma de desgaste inofensiva quando comparada com o desgaste adesivo, não existe grande investigação quanto ao seu controlo. Porém, um método para reduzir o desgaste é a remoção da fonte de oxigénio que na maioria é o ar, das superfícies desgastadas, por meio de um fluxo de azoto, embora a remoção total do oxigénio pode resultar em desgaste adesivo severo. A modificação da superfície metálica, com a produção de um revestimento superficial resistente à corrosão, pode ser um meio eficaz de prevenção do desgaste, embora seja necessário confirmá-lo experimentalmente.⁹

Em geral, o desgaste é avaliado pela quantidade de volume de material perdido e pelo estado da superfície de desgaste. O grau de desgaste é calculado pela taxa de desgaste, coeficiente de desgaste e taxa de desgaste específica (constante de proporcionalidade). A taxa de desgaste, t_d , é definida pelo volume de desgaste, V_d , por unidade de distância de deslizamento, L .¹⁶

$$t_d = \frac{V_d}{L} \quad \text{Equação 1.2}$$

O coeficiente de desgaste, K_d , é dado pelo volume de desgaste por unidade de carga normal aplicada, N , e distância de deslizamento. A taxa de desgaste específica, K_H , é o produto entre o coeficiente de desgaste e a dureza, H , do material mais macio.¹⁶

$$K_d = \frac{V_d}{NL}$$

Equação 1.3

A gama de valores do coeficiente de desgaste de materiais metálicos em contacto de deslizamento em condições de lubrificação distintas é apresentada na figura 1.2.¹⁶

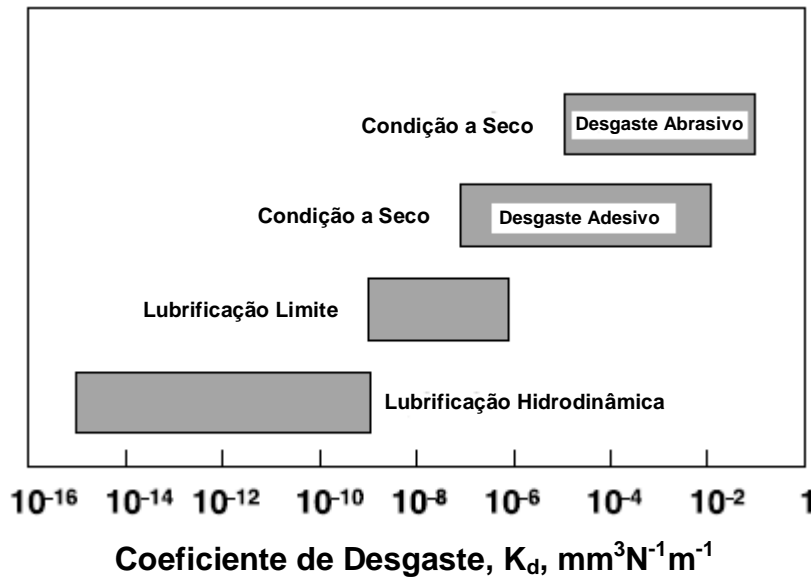


Figura 1.2: Distribuição do coeficiente de desgaste para materiais metálicos em contacto de deslizamento, sujeito a diferentes condições de lubrificação.¹⁶

Os coeficientes de desgaste observados mostram uma distribuição ampla na gama de 10^{-15} a $10^{-6} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$, pelos diferentes estados de lubrificação.

No intervalo de 10^{-7} a $10^{-2} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$, prevalece o desgaste maioritariamente adesivo e na gama de 10^{-5} a $10^{-1} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$, domina o regime de desgaste abrasivo. Sobretudo nos metais, a adesão combinada com alguma abrasão moderada, ou a abrasão por vezes já catastrófica, e aí dominante, são causas de maior desgaste.

O desgaste pode ser classificado em desgaste moderado ou severo. Se o coeficiente de desgaste, K_d , for $\approx 10^{-5} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$, é considerado moderado. Abaixo disto o desgaste é dito de suave, ou mesmo de ultra-suave se ainda mais baixo do que $10^{-6} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$. Este seria o domínio ideal e de boa aplicabilidade prática dos materiais em deslizamento seco. Por sua vez, se $K_d > 10^{-5} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$, o desgaste é considerado severo.¹⁶

1.1.4. Compatibilidade Tribológica

O atrito e desgaste não dependem apenas das condições de trabalho (factores extrínsecos como atmosfera, humidade, temperatura, carga, velocidade de deslizamento) mas também do material (factores intrínsecos como natureza química, processo de fabrico, rugosidade, porosidade, propriedades mecânicas, etc).

Metais compatíveis metalurgicamente são aqueles em que o diagrama de fases apresenta miscibilidade líquida total, ou seja, só existe uma fase líquida presente, e há solubilidade sólida à temperatura ambiente de um metal no outro de, pelo menos, 1% em volume. No entanto, estes são incompatíveis tribologicamente.⁸

Os metais para aplicações em pares tribológicos deverão ter no seu diagrama de fases duas fases líquidas ou, pelo menos, uma fase líquida mas com solubilidade sólida muito baixa (inferior a 0,1 %vol.). Por esta razão, deve ser evitado o mesmo material como par tribológico.⁸

A análise anterior, para o caso de uma liga, deve ser feita em relação ao constituinte em maior concentração volúmica na liga, ignorando os restantes elementos. Excepção à regra verifica-se numa liga com um constituinte macio em pequena concentração volúmica com forte impacto no coeficiente de desgaste. Outras excepções acontecem quando um dos materiais é um compósito de metal com material auto-lubrificante (lubrificante sólido). Neste caso, a acção do lubrificante sólido é determinante e as suas propriedades e concentração volúmica no compósito afectam consideravelmente os valores de desgaste. Uma vez que o desgaste é inevitável, a escolha dos materiais terá que ser feita de maneira a que um deles sofra baixo desgaste e o outro maior desgaste. O de maior desgaste deverá ser o mais barato e aquele a substituir.⁸

O desgaste pode ser diminuído com um bom acabamento superficial e assegurando superfícies de contacto isentas de partículas sólidas soltas. Os resíduos de desgaste formados, separando os corpos, podem ser importantes na diminuição do desgaste e, principalmente no atrito, se tiverem forma de rolos.⁹

Um “mapa” geral que mostra os metais que podem deslizar mutuamente e quais os pares de metais a evitar, é apresentado na figura 1.2.

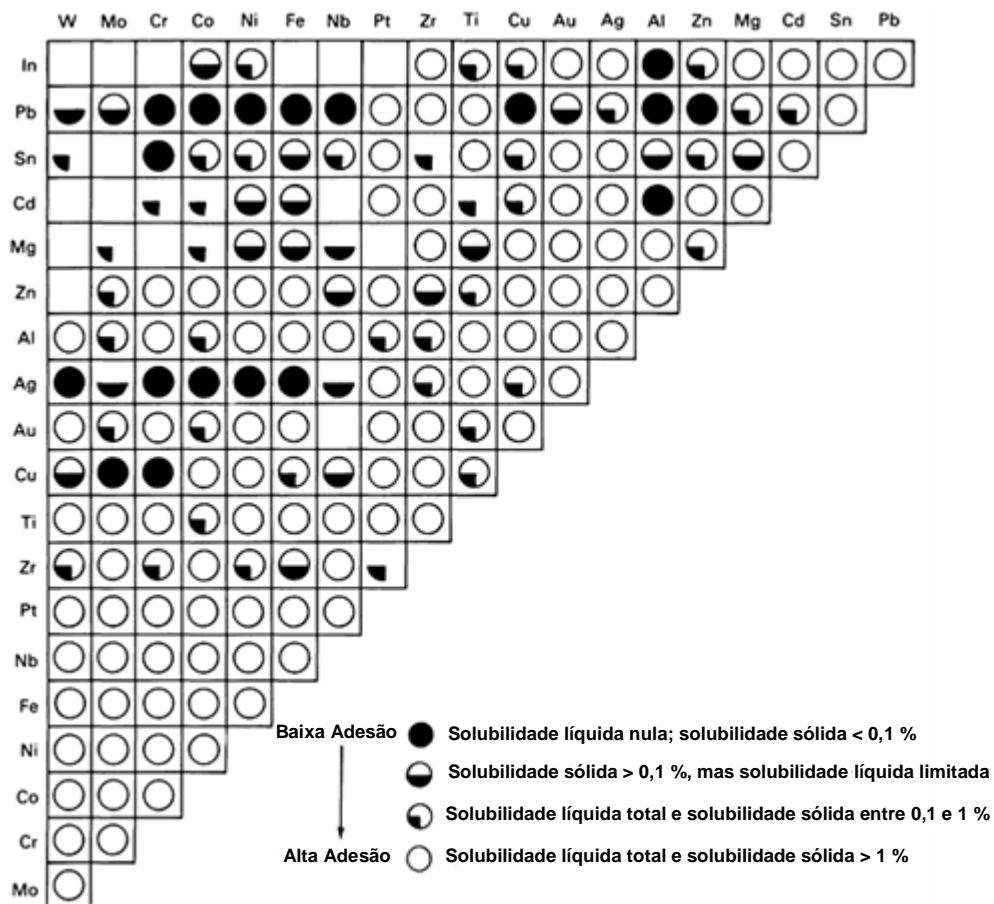


Figura 1.3: Mapa de compatibilidade para seleccionar combinações de metais, derivado de diagramas de equilíbrio binários.¹⁷

O “mapa” indica o grau de adesão esperado (e por isso o atrito), entre as várias combinações de metais.

As ligas de cobre e as de bronze em contacto contra aço, pela elevada compatibilidade tribológica e menor coeficiente de atrito, comparativamente a outros pares, têm grande aplicação em maquinaria, como chumaceiras.¹⁸ Devido à superior dureza do aço, sacrifica-se a liga oponente no desgaste, protegendo-se assim o aço. O ferro fundido cinzento é um material que pode ser utilizado contra ele próprio, em situações em que a lubrificação pode não ser total. Esta utilização deve-se à presença da grafite, que é um lubrificante sólido.

1.2. Materiais Utilizados para Corrediças

1.2.1. Bronze de Alumínio e Bronze de Alumínio Grafitado

Os bronzes de alumínio são uma série de ligas de cobre que contêm até 14% (peso) de alumínio e frequentemente outros elementos de liga como o níquel, ferro, manganês e silício.¹⁹

Os bronzes são amplamente utilizados em diversas aplicações tribológicas. O elevado preço do estanho levou à sua substituição por alumínio, chumbo, berílio e silício. Estes bronzes são empregues em engrenagens, órgãos de máquinas, corrediças, barras de deslize, arquitectura e decoração.²⁰

O bronze de alumínio é um dos materiais de engenharia mais versáteis para aplicação em resistência ao desgaste, devido às suas excelentes propriedades físicas, mecânicas e tribológicas, podendo trabalhar sob ambiente corrosivo e elevado esforço mecânico.^{21,22}

Nos últimos 20 anos, muita atenção tem sido dada ao comportamento tribológico dos bronzes de alumínio. Sullivan e outros, citados por Li e outros,²³ estudaram o desgaste dos bronzes de alumínio em deslizamento contra aço em condições de lubrificação limite, tendo proposto um modelo teórico da resposta tribológica. No que diz respeito ao efeito da adesão e da dureza no atrito dos bronzes de alumínio, concluíram que não havia correlação entre o coeficiente de atrito e a dureza volúmica, taxa de encruamento e dureza superficial. Poggie e outros, também citados por Li,²³ investigaram o efeito do estado superficial no atrito e desgaste dos bronzes. Descobriram que o alumínio se difunde até à superfície, formando uma camada de óxido de alumínio, à medida que a quantidade de alumínio aumenta, cuja evolução origina aumento do desgaste adesivo.

As ligas comerciais que contêm mais do que 8%(peso) de alumínio quase sempre têm adições propositadas de ferro. O ferro actua como refinador de grão durante a solidificação e o arrefecimento e melhora as propriedades mecânicas.²²

O bronze com cerca de 10%(peso) de alumínio, exhibe o melhor conjunto de propriedades mecânicas e tribológicas e está entre os materiais mais amplamente utilizados da família dos bronzes.²² As ligas que contêm acima de 14%(peso) de alumínio são usadas para aplicações que requerem maior dureza e resistência ao desgaste, mas que não estejam sujeitas a elevados esforços mecânicos²⁴, embora as ligas industriais raramente tenham mais do que 12%(peso) de Al.²⁵

Os bronzes de alumínio com menos de 8%(peso) de alumínio possuem uma estrutura monofásica, designada por fase α .^{19,21} Os bronzes bifásicos ($\alpha+\beta$) possuem teores de alumínio entre 8 e 11%(peso).^{19,26}

Com o aumento da quantidade de alumínio até ao limite de solubilidade, 9,4%(peso), o coeficiente de atrito diminui, enquanto que, sobretudo no deslizamento contra aço, a perda de massa por desgaste aumenta.^{22,26}

Os bronzes de alumínio possuem elevada dureza e resistência à compressão à temperatura ambiente, exibindo boas propriedades mecânicas mesmo a elevadas temperaturas devido à presença de partículas finas de ferro (δ) e precipitados de Cu-Al, juntamente com a fase α (solução sólida de alumínio em cobre), dúctil por natureza.^{11,27}

As ligas de cobre podem ser divididas em ligas de trabalho mecânico e de fundição. A mais comum é a designação UNS (Unified Numbering System). Começa com a letra “C”, seguida de 5 algarismos sem significado em termos de composição química ou resistência. Os algarismos destinam-se apenas a distinguir as diferentes ligas existentes.²⁰ O bronze de alumínio referido neste trabalho pertence à classe das ligas de fundição. Na tabela 1.2 estão alguns exemplos de bronzes.

Tabela 1.2: Composição de bronzes para fundição.²⁰

Cobres (99,3 % Cu mínimo)		Composição química (%)											
Nº UNS		Descrição		Cu Mínimo		Outros							
Bronzes		Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Sb	Ni	S	P	Al	Si	Mn
C86100	Bronze de manganês	66-68	0,2	0,2	Rest.	2-4					4,5-5,5		1,5-5
C86700	Bronze de manganês e chumbo	55-60	1,5	0,5-1,5	30-38	1-3		1			1-3		1-3,5
C87300	Bronze de silício	94 min.		0,2	0,25	0,2						3,5-4,5	0,8-1,5
C90200	Bronze de estanho	91-94	6-8	0,3	0,5	0,2	0,2	0,5	0,05	0,05	0,005	0,005	
C90300	Bronze de estanho-zinco	86-89	7,5-9	0,3	3-5	0,2	0,2	1	0,05	0,05	0,005	0,005	
C92410	Bronze de estanho e chumbo	Rest.	6-8	2,5-3,5	1,5-3	0,2	0,25	2,0			0,005	0,005	
C94300	Bronze de estanho com elevado teor de chumbo	68,5-73,5	4,5-6	22-25	0,8	0,15	0,8	1,0	1,0	0,08	0,005	0,005	
C94800	Bronze de níquel-estanho	84-89	4,5-6	0,3-1	1-2,5	0,25	0,15	4,5-6	0,05	0,05	0,005		0,2
C95200	Bronze de alumínio	86 min.				2,5-4					8,5-9,5		
C95500	Bronze de níquel-alumínio	78 min.				3-5		3-5,5			10-11,5		3,5

Em certos sistemas tribológicos, o bronze de alumínio impregnado com grafite é um compósito que alia as boas propriedades do bronze com as conferidas pela grafite. É conhecido que a grafite possui características lubrificantes que se devem ao arranjo dos átomos no material, formando estruturas em forma de folhas, atraídas entre si por ligações

fracas de Van der Walls. Estes compósitos auto-lubrificantes têm recebido atenção devido ao baixo coeficiente de atrito e reduzido desgaste, redução do aumento da temperatura na superfície de contacto, melhoramento da maquinabilidade, excelente efeito anti-gripagem, baixo coeficiente de expansão térmica e elevada capacidade de amortecimento. Em geral, durante o deslizamento a seco de compósitos metal/grafite, forma-se uma camada contínua de lubrificante sólido na tribosuperfície. Este filme lubrificante resulta da ruptura de partículas de grafite localizadas imediatamente abaixo da superfície de deslizamento do compósito. Actua na redução das tensões de corte transferidas para o material abaixo da área de contacto, alivia a deformação plástica na região de sub-superfície e, ainda, previne o contacto metal-metal das duas superfícies em deslizamento. Por esse motivo, ajuda no controlo do atrito e na redução do desgaste, melhorando a resistência à gripagem do compósito. A formação e retenção desta tribocamada sobre a superfície de deslizamento, bem como a sua composição, área exposta, espessura e dureza, são factores importantes no controlo do comportamento ao desgaste do material. Este depende da natureza da superfície de deslizamento, das condições de teste, ambiente e quantidade de grafite no compósito.²⁸

Um bronze impregnado com lubrificante sólido (como exemplo a grafite), apresenta ainda maior capacidade de carga, com elevada temperatura de serviço (até $\approx 500^{\circ}\text{C}$).⁵

Jia e colaboradores²⁹ estudaram o comportamento ao atrito e desgaste dum compósito bronze-grafite no deslizamento contra aço inoxidável, a seco e sob lubrificação com água. Observaram que o coeficiente de atrito em deslizamento a seco, para várias cargas aplicadas, foi cerca de 0,23, que é um valor considerado baixo para este tipo de condição.

Na literatura,¹⁰ os valores para o coeficiente de desgaste para o bronze com grafite encontram-se no intervalo de 10^{-5} e $10^{-4} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$. Estes valores são para o bronze com grafite em contacto seco com ligeiras cargas e baixas velocidades de deslizamento contra aço macio ($R_A = 0,15 \mu\text{m}$).

1.2.2. Liga de Zinco-Alumínio

Tem havido uma pesquisa contínua com o intuito de descobrir novos materiais alternativos para aplicações de engenharia, de modo a reduzir o custo de produção sem sacrificar os requisitos necessários para o seu desempenho. As ligas à base de zinco, de elevada resistência, são uma recente descoberta, oferecendo benefícios relativamente aos materiais concorrentes, como as ligas à base de cobre e outras ligas ferrosas e não ferrosas em várias aplicações de engenharia. As ligas à base de zinco revelaram-se como substitutos

possíveis em termos de custo e energia face aos bronzes em várias aplicações sujeitas ao desgaste.³⁰

A necessidade da utilização das ligas à base de zinco, como substituição dos bronzes/latões surgiu na Alemanha com o início da II Guerra Mundial, durante o período de 1939 a 1943, como resultado da fraca oferta de cobre que se notava na altura, já que o cobre é o principal constituinte dos bronzes e latões. Quando a II Guerra Mundial terminou, e a oferta de cobre voltou aos níveis normais, todas as aplicações que envolviam as ligas à base de zinco foram novamente substituídas pelos bronzes/latões, pelo simples facto de que o conhecimento das novas ligas à base de zinco não era grande.³⁰

Só em 1970 surgiram três composições de “elevada resistência” de ligas à base de zinco, contendo 8 a 28 % de alumínio, 1 a 3 % de cobre e ~0,05 % de magnésio. As ligas eram designadas por ZA-8, ZA-12 e ZA-27, onde os dígitos correspondem à quantidade aproximada de alumínio.³⁰

As ligas à base de zinco com elevada quantidade de alumínio, compreendem uma nova família de ligas de fundição que têm sido aplicadas em áreas exigentes.³¹

Muitas das aplicações destas ligas envolvem desgaste por deslizamento contra componentes de aço.³¹ As ligas à base de zinco compreendem grandes quantidades de alumínio, alguma quantidade de cobre e pouca quantidade de magnésio. O alumínio é o elemento principal responsável pelo processo de solidificação da liga, enquanto que o cobre e o magnésio produzem efeitos de reforço.³²

Em termos microestruturais, as ligas à base de zinco possuem uma mistura de duas soluções sólidas dúcteis, uma fase α rica em alumínio e uma fase η rica em zinco. Existe também um fase ϵ metaestável em pequena quantidade, que se forma quando a liga possui uma percentagem em cobre acima de 1%(peso). O maior microconstituente (η) é lubrificante por natureza (estrutura cristalina hexagonal) e suporta a carga aplicada juntamente com a fase α , que possui boa deformabilidade.^{11,13,30,31,33,34} A fase ϵ possui uma dureza superior às fases α e η e promove resistência ao desgaste.^{13,31}

Contudo, a resistência da liga de zinco-alumínio deteriora-se para elevadas temperaturas, contrariamente ao bronze de alumínio, devido aos baixos pontos de fusão dos seus elementos.¹¹ Ainda assim, o desempenho desta liga é bom para condições de baixa velocidade de deslizamento/baixa temperatura (até 100°C).³⁰

Prasad¹¹ comparou o comportamento tribológico de um bronze de alumínio e uma liga de zinco-alumínio no contacto com aço, sujeito a variações de pressão aplicada e de

velocidade de deslizamento. A baixa velocidade (0,42 m/s), a liga de zinco-alumínio apresentou um bom desempenho, devido ao menor calor gerado por atrito, originando menor perda de massa por desgaste relativamente ao bronze de alumínio. O bronze de alumínio apresentou melhor resistência à gripagem para baixas velocidades (0,42 m/s), apesar de não conter uma fase lubrificante. Para elevadas velocidades de deslizamento (4,60 m/s), o calor gerado por atrito diminui a resposta ao desgaste da liga de zinco-alumínio. Apesar das boas propriedades de lubrificação, a liga deteriorou-se para elevadas velocidades. Portanto, a superior estabilidade térmica do bronze de alumínio é responsável pelo aumento da sua resistência ao desgaste.

1.2.3. Metal Duro

O metal duro é um compósito constituído por um carboneto refractário, o carboneto de tungsténio (WC), e uma fase metálica, geralmente de cobalto. A fase do carboneto contribui com a dureza e a resistência ao desgaste enquanto que a fase metálica, que tem o papel de ligante, confere ductilidade ao material. O WC pode apresentar-se só ou associado com outros carbonetos, em particular o carboneto de titânio (TiC), de vanádio (V_4C_3), de nióbio (NbC) e de tântalo (TaC). O cobalto é o metal frequentemente mais utilizado, embora outros, como o níquel, também possam ser usados.³⁵

O metal duro é produzido por via pulverometalúrgica a partir de múltiplas composições químicas e com pós de diversas granulometrias.

Estes materiais exibem considerável dureza, apresentando um nível elevado de resistência. Estas características podem ser facilmente ajustadas variando a composição da liga. Por exemplo, quanto maior for a quantidade de WC, mais dura é a liga. As propriedades finais da liga resultam da combinação das propriedades dos constituintes individuais. Em alguns casos, pequenas quantidades de outros carbonetos refractários são adicionadas para inibir o crescimento do grão do WC durante a sinterização, não afectando directamente as propriedades da liga.³⁵

O carboneto de tungsténio não é o carboneto mais duro nem o cobalto o metal mais resistente, mas a liga WC-Co é a melhor combinação para metais duros.³⁵

Os cristais de WC sofrem deformação plástica. Este facto, aliado à ductilidade do metal ligante explica em parte a capacidade ímpar do WC-Co em suportar esforços mecânicos muito elevados. Outra característica importante do WC é o seu módulo de elasticidade extremamente elevado (~700 GPa), apenas superado pelo diamante. Em aplicações onde é

necessário melhorar a resistência à corrosão e/ou reduzir as propriedades ferromagnéticas do metal duro, é usual substituir o Co pelo Ni e/ou pelo Cr, apesar da sinterabilidade diminuir.³⁵

Em termos comerciais, a percentagem de cobalto pode variar de 5 a 25% em peso, podendo o tamanho médio do grão de WC variar de 1 a 10 μm .⁵

A dureza pode ultrapassar 2000Hv ($\approx 19,6$ GPa). Para o mesmo teor de Co, a dureza diminui com o aumento de tamanho de grão de WC. Para o mesmo tamanho de grão, a dureza diminui com o aumento do teor de cobalto. A resistência à compressão pode atingir os 7000 MPa. A tenacidade à fractura varia entre 6 e 25 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, aumentando com o tamanho de grão de WC e com o aumento do volume de Co.⁵

O coeficiente de atrito diminui com o aumento do teor de Co, a seco e com lubrificação. O desgaste abrasivo é maior com o aumento de grão de WC e com o teor de Co, em contacto homólogo.⁵

O metal duro tem aplicações em poços e refinarias de petróleo, minas, celulose, sobretudo em processos não corrosivos.⁵

1.2.4. Ferro Fundido Cinzento

Os ferros fundidos cinzentos são materiais com particular aptidão ao processamento por fundição, como aliás a sua designação sugere. Esta característica resulta da sua composição química, próxima da eutética, que lhes garante uma baixa temperatura (ou intervalos de temperaturas) de fusão, relativamente às restantes ligas ferrosas.³⁶

Um ferro fundido é uma liga ferrosa com um teor em carbono superior a 2%. É pois uma liga Fe-C que sofre a reacção eutética durante a solidificação. O material apresenta uma excelente aptidão à maquinagem e boa resistência ao desgaste por atrito, dada a presença da grafite, que actua como lubrificante. Daí a sua aplicação em segmentos de pistões, tambores e sapatas de travões, blocos de motores de combustão interna, discos de embraiagem, etc.. A resistência ao choque térmico é elevada, o que permite aplicações em cadinhos, queimadores, peças para fogões, lingoteiras. Apresenta uma alta capacidade de amortecimento de vibrações, pelo que se aplica em estativos de máquinas ferramentas. A resistência à corrosão é também elevada, permitindo aplicações do material em condutas de água e na indústria química em geral.³⁶

Os ferros fundidos são convencionalmente usados em muitas aplicações de desgaste por deslizamento. Algumas delas envolvem condições de deslizamento a seco como travões, enquanto que os lubrificantes são usados em condições de deslizamento severo.¹³

O ferro fundido cinzento possui flocos de grafite numa matriz de bainite ou martensite. Estes flocos formam uma camada na interface de deslizamento, reduzindo o atrito e o desgaste. O aço apresenta um coeficiente de atrito de 0,8 em deslizamento contra si mesmo, enquanto que o ferro fundido apresenta um coeficiente de atrito de 0,4 contra aço.¹⁸

Quando é necessária elevada resistência à abrasão, são utilizados os ferros fundidos de matriz endurecida e inclusões duras, já que a resistência ao desgaste é proporcional à dureza do material de desgaste. Em geral, a dureza dos ferros fundidos aumenta com o aumento do volume de carbonetos na matriz.¹⁸

1.2.5. Latão de Alta Resistência

O latão e suas ligas são vastamente utilizados em componentes de máquinas sujeitas a atrito, como rolamentos lineares e casquilhos. Propriedades como elevada resistência e ductilidade, resistência à fadiga, resistência ao desgaste, etc, são necessárias para estes componentes.^{37,38}

As composições do sistema de ligas Cu-Zn com interesse técnico, de acordo com a NP-861 são:²⁴

- | | |
|---------------------|-------------------|
| • Cu > 55 % | Zn < 45 % |
| • Cu – 80 a 95 % | Zn – 5 a 20 % |
| • Cu \approx 70 % | Zn \approx 30 % |
| • Cu \approx 65 % | Zn \approx 35 % |
| • Cu \approx 63 % | Zn \approx 37 % |
| • Cu \approx 60 % | Zn \approx 40 % |

Industrialmente usam-se ligas monofásicas α ou β e as difásicas $\alpha + \beta'$, com percentagens de zinco que variam de 10 a 45 %.²⁴

A adição de zinco ao cobre aumenta a resistência mecânica, aumenta a ductilidade, baixa o ponto de fusão e reduz o custo.^{24,27}

Na indústria automóvel, na produção de componentes onde a resistência ao desgaste é um requisito necessário, são frequentemente utilizados os latões de alta resistência. Estes latões são empregues em aplicações de engenharia onde são requeridas elevadas resistências, de modo a suportar cargas pesadas, e onde são fundamentais elevadas resistências ao desgaste e à corrosão.³⁹

As principais vantagens dos latões de alta resistência são o melhoramento das propriedades mecânicas por tratamento térmico, bem como o seu baixo custo.³⁹

Os latões de alta resistência podem ser classificados principalmente como latões β ou $\alpha + \beta$, dependendo das fases presentes na microestrutura. Os elementos de liga como o

alumínio, silício, ferro, manganês e estanho são adicionados aos latões para assegurar elevado desempenho em serviço, entrando na solução sólida e/ou formando compostos intermetálicos na microestrutura. No caso das ligas que contêm adições de silício e manganês, formam-se compostos intermetálicos Mn_5Si_3 . Estes compostos possuem uma estrutura cristalina hexagonal e uma elevada dureza, conferindo elevada resistência ao desgaste.^{39,40}

No sistema Cu-Zn, o melhor desempenho ao nível da resistência ao desgaste acontece para uma quantidade de 25%(peso) de zinco, enquanto que um aumento dessa quantidade para valores de 48% melhora a dureza sem, no entanto, melhorar o desempenho ao nível do desgaste. Por outro lado, a menor taxa de desgaste é obtida quando a microestrutura é composta pela fase β e cerca de 25% da fase α , localizada preferencialmente nas fronteiras de grão.^{39,40}

De acordo com Sadykov e colaboradores citados por Mindivan e co-autores,⁴⁰ o latão $\alpha + \beta$ com grão ultra-fino (2-3 μ m) exibe melhor resistência ao desgaste do que os latões de fase β e $\alpha + \beta$ de grão grosseiro, tratados termicamente.

Na tabela 1.3 estão descritos alguns exemplos de latões de acordo com a designação UNS.

Tabela 1.3: Composição de latões segundo a norma UNS.²⁰

Cobres (99,3 % Cu mínimo)		Composição química (%)									
Nº UNS	Descrição	Cu Mínimo		Outros							
Ligas cobre-zinco (latões)		Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Ni	P	Al	Si	Outro
C83300	Latão de baixo zinco	92-94	1-2	1-2	2-6						
C83600	Latão vermelho 5-5-5	84-86	4-6	4-6	4-6	0,3	1	0,05	0,005	0,005	0,25 Sb, 0,08 S
C84500	Latão semi-vermelho	77-79	2-4	6-7,5	10-14	0,4	1	0,02	0,005	0,005	0,25 Sb, 0,08 S
C85200	Latão de chumbo amarelo	70-74	0,7-2	1,5-3,8	20-27	0,6	1	0,02	0,005	0,05	0,2 Sb, 0,05 S
C85500	Latão amarelo	59-63	0,2	0,2	Rest.	0,2	0,2			0,05	0,2 Mn
C85700	Latão de chumbo amarelo	58-64	0,5-1,5	0,8-1,5	32-40	0,7	1		0,8		
C86300	Latão de manganês	60-66	0,2	0,2	22-28	2-4	1		5-7,5		2,5-5 Mn
C87500	Latão de silício	79 min.		0,5	12-16				0,5	3,5	

1.3. Aço

O aço é uma liga metálica de ferro e carbono, com um teor em carbono até 2%.

As propriedades de uma liga metálica são função da respectiva composição química e do processamento a que a mesma foi sujeita, ou seja, da sua história térmica e mecânica. Estes

factores (composição e história termomecânica) impõem uma dada microestrutura ao material, a qual será responsável pelas propriedades finais do mesmo.³⁶

A composição química define as potencialidades "inatas" da liga. Por exemplo, um aço de baixo carbono é presumivelmente dúctil, porém pode ser fragilizado por um tratamento térmico que desenvolva um grão grosseiro.³⁶

Os aços são materiais estruturais empregues em quase todo o tipo de máquinas e estruturas, devido à elevada resistência, boa maquinabilidade e baixo custo. As aplicações tribológicas são em engrenagens, rolamentos, ferramentas, rodas, etc., que necessitam de suportar cargas pesadas com um mínimo de deformação elástica e uma separação mínima das superfícies durante um longo período de tempo. A dureza dos aços pode ser controlada pela quantidade de carbono e tratamento térmico desde ~1 GPa a ~3 GPa, o que dá uma escolha dos aços para cada tribo-elemento.¹⁸

Em muitos tribo-sistemas feitos de aço, as interfaces de contacto são lubrificadas com lubrificantes líquidos e o atrito e desgaste são sujeitos à forte influência das condições de operação, o que determina o estado de lubrificação.¹⁸

No estado de lubrificação hidrodinâmica, o atrito depende principalmente da viscosidade do líquido e a forma de separação do filme líquido. No estado de lubrificação limite ou mista, o filme lubrificante é penetrado pelas asperidades da superfície em contacto, e o coeficiente de atrito é aumentado em cerca de 0,1 e o desgaste é gerado como resultado.¹⁸

As asperidades duras actuam como abrasivos causando a falha do filme lubrificante, porque a pressão real em cada asperidade em contacto é aproximadamente igual ao valor de dureza do material da asperidade. Por outro lado, a falha do filme lubrificante na interface de contacto ocorre mais facilmente em superfícies com maior rugosidade, já que os contactos reais entre asperidades na interface são localizados e as pressões de contacto tendem a ser maiores do que em superfícies mais lisas. Por isso, a escolha da dureza do aço terá que ser feita em relação à rugosidade da superfície dos tribo-elementos e as propriedades do lubrificante, especialmente no contacto entre aços.¹⁸

Quando os aços têm contactos com partículas abrasivas ou superfícies abrasivas sem lubrificação, a sua dureza é uma boa medida da resistência ao desgaste abrasivo. É expectável a elevada resistência ao desgaste abrasivo de aços duros, desde que fases frágeis não sejam introduzidas na matriz.¹⁸

1.3.1. Classificação dos Aços

A correcta caracterização de um aço exige, embora seja insuficiente, a determinação da composição química. Esta exprime-se vulgarmente através de classificações ou códigos definidos por instituições internacionais. As mais relevantes são a American Iron and Steel Institute (AISI) e a DIN de origem alemã.³⁶

1.3.1.1. Sistema Americano (AISI / SAE)

O sistema de classificação da AISI é frequentemente adoptado pela Society of Automotive Engineers (SAE), pelo que é referido abreviadamente por AISI-SAE. Consiste num sistema numérico de quatro ou cinco algarismos, indicando os dois (ou três) últimos o teor em carbono do aço em centésimos. Os dois primeiros indicam se o aço é ou não ligado e qual o tipo de liga.³⁶

1.3.1.2. Sistema Alemão (DIN)

A especificação DIN 17 006 estabelece o modo de abreviar as diferentes composições de aços. Os aços sem liga são designados pela letra C seguida do respectivo teor em carbono em centésimos (Ck se o aço é de qualidade superior – aços ditos especiais, conforme se apresenta em seguida).³⁶

Os aços ligados são classificados em fracamente ligados e fortemente ligados conforme não exista ou exista um elemento cujo teor seja pelo menos de 5% (ponderal).³⁶

Os aços fracamente ligados são designados pelo seu teor em carbono, em centésimos, e pela descrição da natureza dos diferentes elementos de liga (pelo respectivo símbolo químico) e um ou mais números indicando o teor do (ou dos) elementos de liga, afectados por um factor multiplicador (4 ou 10) para que esse teor seja expresso por um número inteiro.³⁶

Os aços fortemente ligados são designados pela letra X seguida do respectivo teor em carbono (em centésimos) e da descrição da natureza dos diferentes elementos de liga através do respectivo símbolo e seu teor nominal.³⁶

1.3.2. Exemplos de Classificação de Aços

Sistema de classificação AISI /SAE:³⁶

1XXX - aço sem liga

- 1045 - aço sem liga com 0,45C
- 1145 - aço de corte fácil com 0,45C (com MnS)
- 1345 - aço de elevada resistência com 0,45C e 1,75Mn
- 2XXX - aço ao Ni
 - 2345 - aço com 0,45C e 3,5Ni
 - 2545 - aço com 0,45C e 5,0Ni
- 3XX - aço austenítico resistente à corrosão ou refractário
- 3XXX - aço ao Cr Ni
 - 3145 - aço com 0,45C 1,25Ni e 0,60Cr
 - 3245 - aço com 0,45C 1,75Ni e 1,0Cr
 - 3345 - aço com 0,45C 3,50Ni e 1,55Cr
- 4XX - aço ferrítico ou martensítico resistente à corrosão ou refractário
- 4XXX - aço ao Mo
 - 4045 - aço com 0,45C e 0,25Mo
 - 4145 - aço com 0,45C 0,50 ou 0,95Cr e 0,25Mo
 - 4345 - aço com 0,45C 1,80Ni 0,50 ou 0,80Cr e 0,25Mo
 - 4645 - aço com 0,45C 1,80Ni e 0,25Mo
 - 4845 - aço com 0,45C 3,5Ni e 0,25Mo
- 5XXXX - aço ao Cr
 - 50100 - aço com 1C e 0,50Cr
 - 51100 - aço com 1C e 1,00Cr
 - 52100 - aço com 1 C e 1,45Cr
- 6XXX - aço ao Cr V

Sistema de abreviatura DIN

- C45 - aço sem liga com 0,45C
- Ck 45 - semelhante ao anterior mas de qualidade superior, dito aço especial
- 45CrMo 4 - aço fracamente ligado com 0,45C 1Cr e Mo não quantificado
- X200Cr12 - aço fortemente ligado com 2C 12Cr

1.3.3. Outros Critérios de Classificação dos Aços

Para além da descrição codificada da composição química, é corrente a definição de outros critérios para a classificação e designação de aços.³⁶

Existem critérios baseados na composição, propriedades, aplicações, etc..

Tendo em conta a composição química, os aços podem ser classificados em não ligados (ou sem liga) e ligados (ou de liga). Existem teores limite para um aço ser considerado não ligado, conforme se descreve em seguida (tabela 1.4), de acordo com a Euronorma EN 10020 de 1989.³⁶

Tabela 1.4: Teores limite para a classificação dos aços como não ligados, conforme a Euronorma EN 10020 de 1989.³⁶

Elemento	% ponderal	Elemento	% ponderal
Al	< 0,10	Ni	< 0,30
B	< 0,0008	Pb	< 0,40
Bi	< 0,10	Se	< 0,10
Co	< 0,10	Si	< 0,50
Cr	< 0,30	Te	< 0,10
Cu	< 0,40	Ti	< 0,05
Lantanídeos	< 0,05	V	< 0,10
Mn	< 1,65	W	< 0,10
Mo	< 0,08	Zr	< 0,05
Nb	< 0,06	Outros	< 0,05

Os aços dizem-se fraca ou fortemente ligados conforme pelo menos um elemento da tabela anterior apresenta um teor, excedendo o referido na tabela, inferior ou superior a 5% (ponderal) respectivamente.³⁶

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Molde Industrial Padrão, Guias e Corrediças

Para que a simulação nos ensaios tribológicos pino/placa a realizar seja, em termos de condições de carga e velocidade, a mais real possível, foi feito um pré-estudo nas corrediças de um molde padrão, de modo a que se possa calcular, teoricamente, a carga mecânica a que as mesmas estão sujeitas num ciclo de injeção, bem como a velocidade de deslizamento das corrediças na guia prismática. A velocidade de deslizamento será dada pela distância a partir da qual as corrediças começam a deslizar na guia prismática até ao final do curso do fecho do molde, em função do tempo.

Para tal, foi utilizado o molde 7191 (designação interna), utilizado para a injeção de um painel da porta de uma viatura comercial (Volvo S60). As figuras 2.1, 2.2 e 2.3, apresentam as formas deste molde.

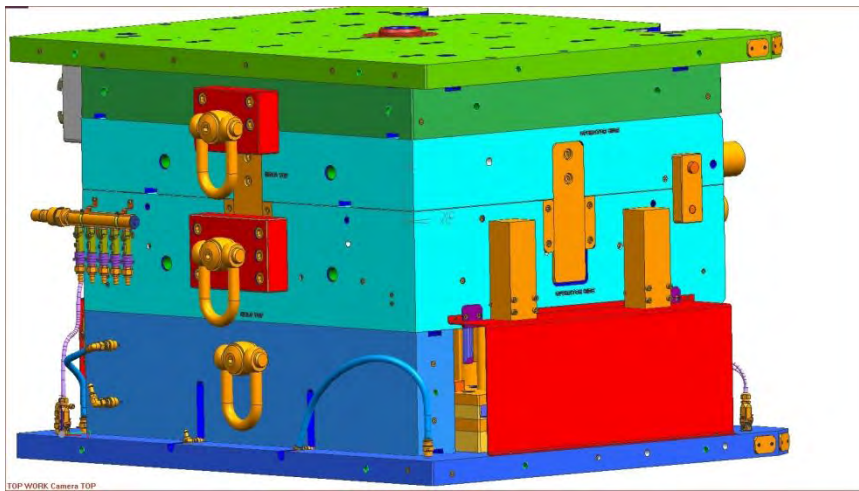


Figura 2.1: Modelo 3D do molde 7191.

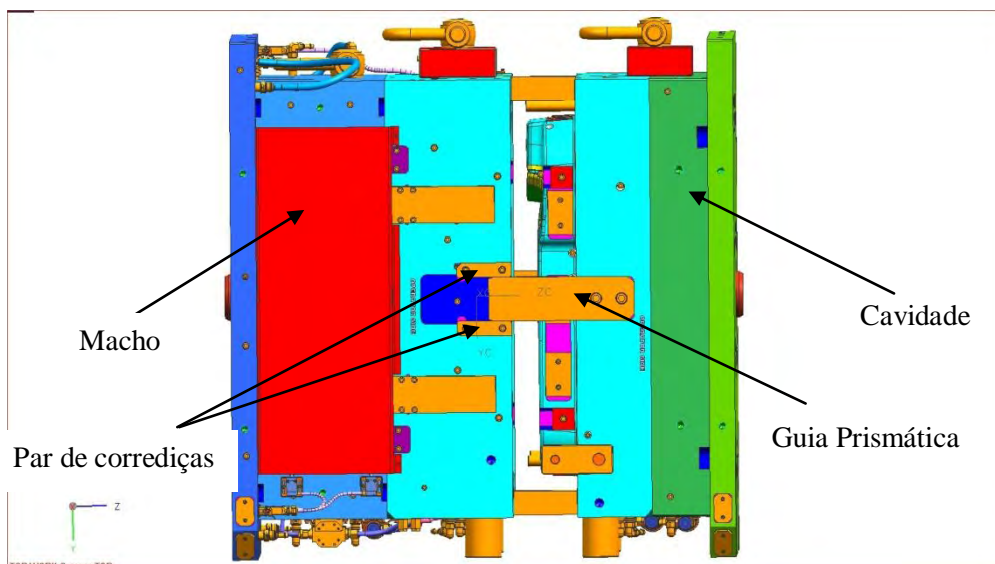


Figura 2.2: Modelo 3D do molde 7191 em posição de injeccção.

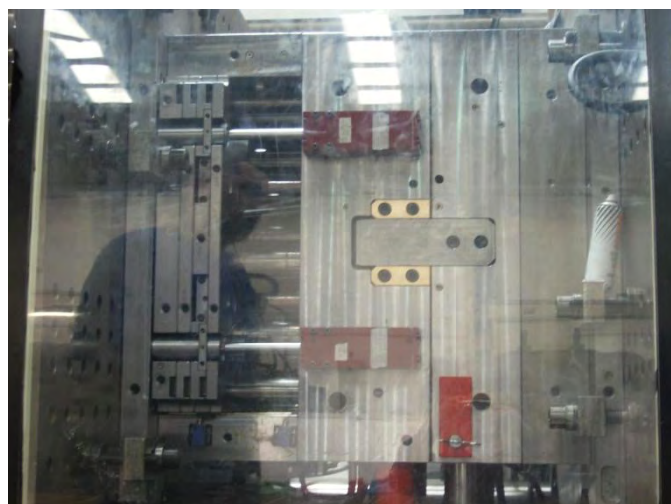


Figura 2.3: Vista real do molde 7191 em ciclo de injeccção.

Os cálculos acima referidos, de carga e velocidade nas corredeiras, são apresentados na abertura do 3º capítulo.

2.2. Materiais Comerciais Seleccionados para os Ensaio Tribológicos

2.2.1. Bronze de Alumínio

O bronze de alumínio utilizado foi o AMPCO 18, produzido pela empresa AMPCO METAL S.A.. A respectiva composição e propriedades são indicadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Composição e propriedades do AMPCO 18.⁴¹

Propriedades Mecânicas	Composição Química (%)		
	Cu	Al	Fe
	86	10,5	3,5
Resistência à Tracção [MPa]	724		
Tensão de Cedência, 0.2% [MPa]	365		
Extensão, 5% [%]	14		
Dureza HB (3000 kgf)	192		
Propriedades Físicas			
Densidade [g/cm³]	7,45		
Coefficiente de Expansão Térmica [µm/mm/°C]	16,2 (a 20°C)		
Condutividade Térmica [W/m.K]	63		

2.2.2. Bronze de Alumínio Grafitado

O bronze impregnado com grafite utilizado no presente trabalho foi o AMPCO 608. As suas características são dadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Composição e propriedades do AMPCO 608.⁴¹

Propriedades Mecânicas	Composição Química (%)						
	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Zn	Sn
	86	10	4	5	< 1	< 0,5	<0,05
Resistência à Tracção [MPa]	690						
Tensão de Cedência, 0.2% [MPa]	320						
Extensão, 5% [%]	13						
Dureza HB (3000 kgf)	170						
Propriedades Físicas							
Densidade [g/cm³]	7,7						
Coefficiente de Expansão Térmica [µm/mm/°C]	16						
Condutividade Térmica [W/m.K]	45						

2.2.3. Liga de Zinco-Alumínio

A liga de zinco-alumínio utilizada nos ensaios tribológicos foi a ZA-27, da empresa ZINCALOY INC.. Na tabela 2.3 são apresentadas as suas características:

Tabela 2.3: Composição e propriedades da liga ZA-27. ⁴²

Propriedades Mecânicas	Composição Química (%)							
	Al	Cu	Mg	Fe	Pb	Cd	Sn	Zn
	25-28	2-2,5	0,01-0,02	0,075	0,006	0,006	0,003	Bal.
Resistência à Tracção [MPa]	421							
Tensão de Cedência, 0.2% [MPa]	379							
Extensão [%]	1-3							
Dureza HB	105-125							
Propriedades Físicas								
Densidade [g/cm³]	5							
Coefficiente de Expansão Térmica [µm/mm/°C]	26 (100-200°C)							
Condutividade Térmica [W/m.K]	125,5							

2.2.4. Metal Duro e Ferro Fundido Cinzento

A tabela 2.4 lista as características das amostras de metal duro, produzido pela empresa Durit, Metalurgia Portuguesa do Tungsténio S.A., e de ferro fundido cinzento de grafite lamelar, maquinado a partir de varão comercial, utilizadas nos ensaios tribológicos.

Tabela 2.4: Composição e características das amostras de metal duro e de ferro fundido cinzento. ⁵

Metal Duro	Composição Química (%)				
	WC	Co			
	95	5			
Tenacidade à Fractura [MPa.m ^{1/2}]	10				
Dureza Hv ₃₀ [GPa]	16,7				
Densidade [g/cm ³]	14,96				
Ferro Fundido Cinzento	Composição Química (%)				
	C	Si	Mn	S	P
	3,9	2,9	0,9	0,04	0,1
Dureza Hv ₃₀ [GPa]	1,9				
Densidade [g/cm ³]	7,07				

2.2.5. Latão de Alta Resistência

O latão de alta resistência utilizado para ensaios tribológicos pino/placa foi o Universal 255 da empresa UNIVERSAL AFIR, S.A. As suas propriedades estão descritas na tabela 2.5.

Tabela 2.5: Composição e propriedades do latão Universal 255.⁴³

Propriedades Mecânicas	Composição Química (%)								
	Sn	Pb	Zn	P	Al	Fe	Ni	Mn	Cu
	0,1	0,2	25	0,05	3-7	1,5-4	3	2,5-5	Bal.
Resistência à Tracção [MPa]	750								
Tensão de Cedência, 0.2% [MPa]	480								
Extensão [%]	5								
Dureza HB 10/1000	190								
Propriedades Físicas									
Densidade [g/cm³]	8,2								
Coefficiente de Expansão Térmica [µm/mm/°C]	18								
Condutividade Térmica [W/m.K]	45-55								

2.2.6. Aço

O aço utilizado como contra – corpo nos ensaios tribológicos foi a referência PM 300 IMPAX SUPREME da empresa F. Ramada, com designação interna de 2738. Segundo a norma DIN, é o aço 40 CrMnNiMo 8-6-4. É um aço fracamente ligado, hipoeutectoide. Algumas características mecânicas, bem como a composição, são indicadas na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Composição e propriedades do aço 2738.⁴⁴

Propriedades Mecânicas	Composição Química (%)						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Outros
	0,37	0,30	1,40	2,00	0,20	1,00	Σ ≤ 0,010
Dureza HB máx.	290/330						
Resistência à Tracção [MPa]	981/1128						
Tensão de Cedência, 0,2 [MPa]	≥ 932						
Estado de Fornecimento	Tratamento Térmico						
Pré-Tratado	Nitruração						
	Dureza Final		Profundidade				
	>618 HB		0,1 a 0,2 mm				

2.3. Técnicas Experimentais de Caracterização e de Ensaio

2.3.1. Microscopia SEM/EDS

A microscopia electrónica de varrimento equipada com sistema de microanálise química por dispersão de energias (SEM/EDS), foi a técnica utilizada para a caracterização morfológica e química das pistas de desgaste e das faces dos pinos, dos materiais ensaiados. O microscópio utilizado foi o Hitachi S-4100, (equipamento que dispõe de microanálise qualitativa por dispersão de energias, EDS, Quantum EDS, Rontec). Para tal, as amostras foram limpas em acetona (PA) durante 10 minutos em banho de ultra-sons, seguido de 5 minutos em etanol (PA), também em ultra-sons. Posteriormente, as placas e as faces dos pinos foram montadas em porta amostras com cola de carbono.

2.3.2. Topografia Superficial - Rugosidade

Os materiais apresentam rugosidade superficial, mais propriamente irregularidades no perfil de superfície com picos e vales, em que os picos (asperidades) têm distribuição e geometria que variam aleatoriamente.⁵

A rugosidade média, R_a , é uma medida dos desvios das asperidades em relação à linha média do perfil de rugosidade. Trata-se da média das ordenadas deste perfil, $Y(x)$, dividida pelo comprimento de referência L , calculadas a partir da linha média que divide o referido perfil em duas superfícies de igual área, sendo o parâmetro mais utilizado como medida de rugosidade.^{5,45} É dada pela equação 2.1.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Y(x)| dx \quad \text{Equação 2.1}$$

Para determinada distância de apalpação, R_a (μm) é normalmente calculada como um valor médio de R_a de vários sub-segmentos consecutivos.

A rugosidade máxima, $R_{\text{máx}}$, consiste na medida do desnível entre o “pico” e o “vale” de uma asperidade, não representando, por isso, a maior altura ou o vale mais fundo a partir da linha média, mas sim a profundidade máxima da rugosidade. Relativamente a $R_{\text{máx}}$, como este valor pode ser afectado por descontinuidades aleatórias na superfície, por partículas ou impurezas estranhas, é mais usual usar uma média de $R_{\text{máx}}$, por exemplo, de medidas consecutivas em 5 partes da distância total de apalpação.^{5,45}

R_z , a altura a 10 pontos, corresponde à distância média entre os 5 picos de asperidades mais altos e os 5 vales mais profundos medidos no comprimento de apalpação. Representa uma média de profundidade de rugosidade.^{5,45}

A rugosidade da guia prismática, das corredeiras e das amostras para ensaios tribológicos pino/placa, foi calculada com recurso a um rugosímetro Perthometer Mahr M1. Trata-se de um rugosímetro de mostrador digital com apalpador mecânico, que em cada medida realiza um pré-varrimento para determinação automática do valor ideal de distância total de apalpação, e que calcula a rugosidade média e altura a 10 pontos de acordo com a norma DIN EN ISO 4287 (1998), e a rugosidade máxima de acordo com a norma DIN 4768 (1990).^{5,45}

Em cada face foram realizadas medidas por varrimentos radiais, transversais e aleatórios.

2.4. Caracterização Tribológica – Ensaio Pino/Placa

2.4.1. Preparação das Faces dos Materiais Comerciais

Os materiais comerciais foram sujeitos a rectificação e polimento das faces. Para os pinos foi utilizado o aço e para as placas os materiais comerciais em estudo. Das duas placas AMPCO 18, uma foi apenas sujeita a rectificação enquanto que a outra foi rectificada e polida. A rectificação foi realizada numa fresadora universal de mesa plana. O polimento foi feito com recurso a lixas de SiC, primeiro de 600 μm e depois com 1000 μm . O polimento teve o propósito de conferir, às faces de trabalho das amostras a testar nos ensaios tribológicos a realizar, valores similares de rugosidade das guias prismáticas e das corredeiras do serviço real.

2.4.2. Equipamento, Procedimento e Parâmetros dos Ensaio Pino/Placa

Equipamento

Os ensaios de simulação do movimento das corredeiras a deslizar nas guias prismáticas foram efectuados num tribómetro universal, Plint & Partners TE92, numa configuração do tipo pino/placa, que do ponto de vista de contacto se identifica como pino/disco.

Este tribómetro é controlado por microprocessador com software próprio para introdução dos parâmetros de ensaio e seu controlo (velocidade de deslizamento, carga,

temperatura, tempo de ensaio e respectivas rampas e patamares) e aquisição ou cálculo de grandezas (coeficiente de atrito, distância total de deslizamento e carga efectiva).^{5,45}

Na figura 2.4 é mostrado o referido tribómetro. É também possível observar a unidade de controlo (microprocessador) e o respectivo computador de “interface”.

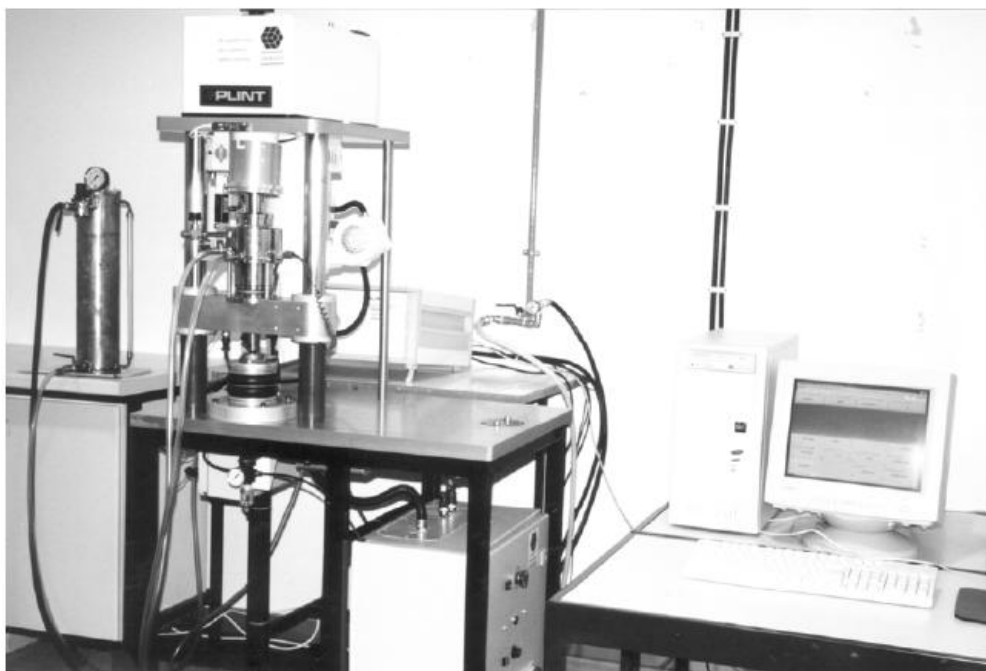


Figura 2.4: Vista geral do tribómetro.

Com este tribómetro, é possível simular várias configurações de testes tribológicos, com ou sem lubrificação: pino (1,2 ou 3)/disco/placa; anel/anel; bloco/bloco; esfera(s)/plano.

Possui capacidade de aquecimento desde a temperatura ambiente até 600 °C de forma indirecta, em atmosfera controlada/protectora de gás, pressão variável do meio fluido lubrificante e possibilidade de recirculação ou renovação contínua do fluido. É também possível simular contactos de deslizamento, rolamento ou mistos, com um dos provetes em rotação contínua, oscilação ou movimento misto.⁵

As geometrias de teste e dimensões, preparação das amostras, parâmetros de teste, características da máquina e procedimento obedecem à norma internacional ASTM G99-95a.⁴⁶

Quando ocorre vibração elevada, o equipamento dispõe de um sistema de detecção. Trata-se de um sensor piezoeléctrico de sensibilidade ajustável por um potenciómetro (10 k Ω) intercalado, que detecta o pico e aborta o ensaio.^{5,45}

Refira-se que no presente trabalho apenas se apelidam os testes tribológicos de configuração pino/placa, porque, efectivamente e em questões de geometria dos provetes, se tratam do tipo cilíndrico (pino rotativo de aço) contra uma placa do tipo paralelepípedica (provetes estático de bronze e variantes referidas). Na realidade, em movimento de ensaio, é executado o procedimento da habitual configuração designada na bibliografia da especialidade como de ensaio de pino-contra-disco, sendo circular a superfície de desgaste resultante na placa, em contacto aberto (o pino não recobre toda a pista, executando passagens cíclicas). O equipamento de ensaios tribológicos utilizado, um tribómetro universal, opera assim como um tribómetro pino-disco, configuração das mais utilizadas no estudo do comportamento tribológicos dos materiais. Para ensaios do tipo pino-disco, e de acordo com a referida norma ASTM G99-95a, ⁴⁶ o citado tribómetro possibilita a caracterização dos mecanismos de desgaste bem como a medição da evolução do atrito ao longo do tempo.

Zonas de trabalho mecânico em ensaio pino/placa

Na figura 2.5 mostra-se um pormenor da zona de ensaio do tribómetro, sendo visível, além dos provetes, a pista circular resultante do deslizamento. Na figura 2.6 encontra-se representado um esquema do ensaio pino/placa.

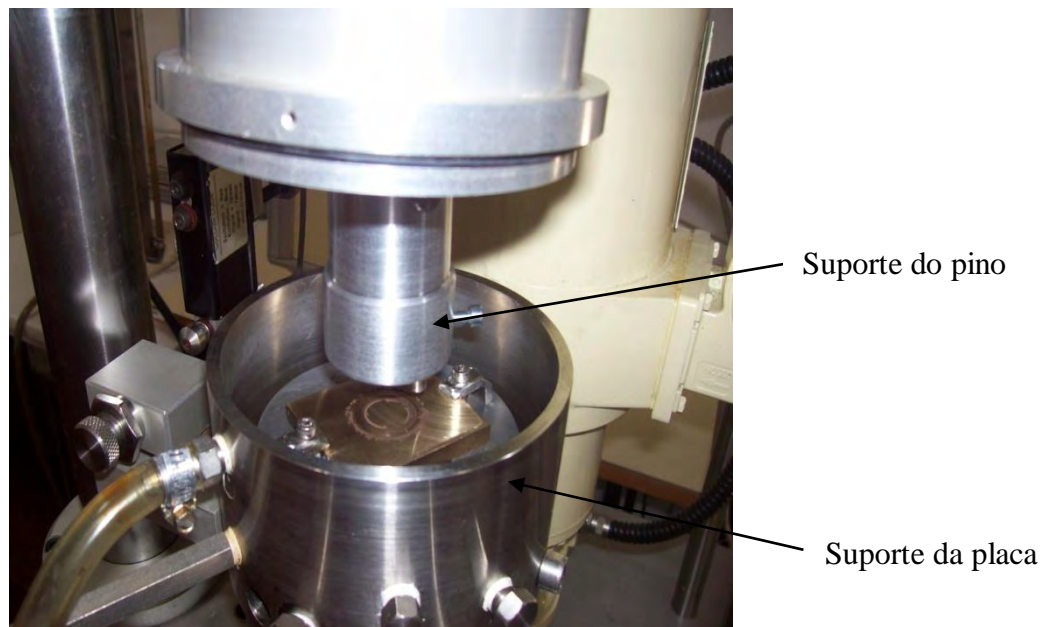


Figura 2.5: Aspecto da zona de trabalho do tribómetro.

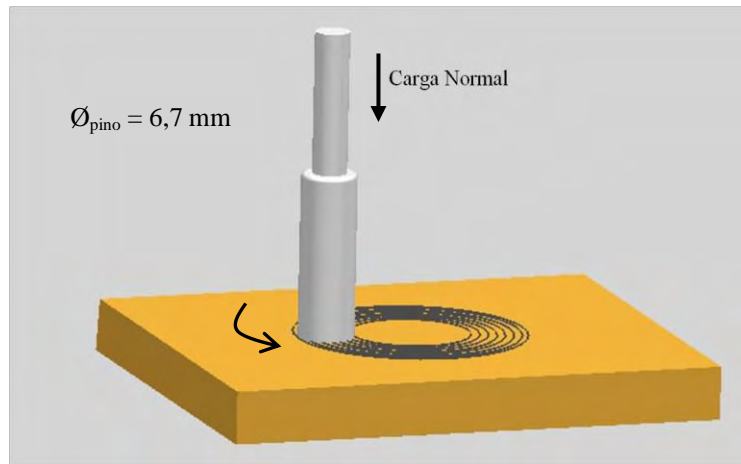


Figura 2.6: Modelo 3D do ensaio pino/placa.

Procedimento e parâmetros dos ensaios pino/placa

Inicialmente, os pinos e as placas foram limpos em banho de ultra-sons, com acetona (PA), durante 5 minutos. Após secagem, foram pesados em balança de 5 e 3 casas decimais, ambas Mettler Toledo, modelos XS 205 (DR) e PB303, respectivamente.

Após fixação do pino e da placa nos devidos suportes e programação do controlador do equipamento, deu-se início ao teste. O mesmo procedimento ocorreu para todos os pares tribológicos.

No final de cada ensaio, os resíduos formados foram recolhidos, os materiais foram retirados, limpos em banho de ultra sons com acetona (PA), secos e pesados. As diferenças de massa, inicial e final, permitem o cálculo do volume de desgaste.

Para microscopia electrónica, portanto para a análise morfológica das diferentes zonas das pistas de trabalho, as amostras foram, posteriormente, limpas por ultra sons em banho de isopropanol (PA), meio líquido que, removendo eventuais impurezas, sobretudo de manuseamento pós-ensaio, deixa, na sua secagem por evaporação natural, as superfícies isentas de aderências de dispersões do banho bem como de manchas marcantes de fases e zonas de secagem.

De referir que os ensaios foram realizados à temperatura ambiente (+/- 23°C) com cerca de 50% de humidade relativa, e sem qualquer lubrificante externo auxiliar. Os parâmetros de programação do tribómetro foram rampas e patamares (estado estacionário de ensaio) de carga normal e de velocidade de rotação, para tempo de cada patamar também pré-estabelecido. Cada programação de um determinado estado estacionário de parâmetros pré-fixos, não significa o estado estacionário de resposta de cada par tribológico, permitindo

apenas ver a evolução do respectivo comportamento, sobretudo em coeficiente de atrito, e concluir sobre a capacidade de funcionamento sem eventual dano pontual ou mesmo danificação irrecuperável das faces (gripagem local ou extensiva). Com sucessivas etapas de variações de carga e/ou de velocidade vão-se descobrindo as capacidades de operação neste regime de deslizamento a seco, e a programação de tempos longos de patamar permite a validação de se ter atingido um qualquer estado estacionário de funcionamento.

Coeficiente de atrito, coeficiente de desgaste e outros parâmetros

O coeficiente de atrito é dado pela razão entre a força de atrito e a carga normal aplicada. O tribómetro possui uma célula de carga lateral que suporta e traduz o momento resistente devido à força de atrito, permitindo determinar o seu valor. Sabendo o valor da carga normal aplicada, pela primeira lei do atrito, é possível determinar em tempo real o coeficiente de atrito, μ . Para calcular o atrito médio da etapa realizada, é feita a média aritmética do atrito instantâneo.

O volume de desgaste, V_d (mm^3), é calculado pela perda de peso dos materiais durante o ensaio (eq. 2.2), sendo m_i (g) e m_f (g), as massas inicial e final, respectivamente, e d_t a densidade teórica do material. Determinando a distância de deslizamento, L (m), e sabendo a carga normal, N (N), obtém-se o coeficiente de desgaste, K_d ($\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$), segundo a equação 1.3.

$$V_d = \frac{m_i - m_f}{d_t} \quad \text{Equação 2.2}$$

Sendo a velocidade de rotação de cada etapa fixa de acordo com o raio da pista de trabalho, calcula-se a velocidade de deslizamento, V (m/s), pela equação 2.3.

$$V = w \cdot 2\pi r_d / 60 \quad \text{Equação 2.3}$$

Nesta equação w (rpm) é a velocidade de rotação, e r_d (m) o raio da pista de trabalho.

Para o cálculo do raio da pista de desgaste utiliza-se o valor do diâmetro médio da pista de trabalho, equação 2.4. Nos ensaios tribológicos foram utilizados dois diâmetros de pista: $\varnothing_{\text{ext}} = 39$ mm, $\varnothing_{\text{int}} = 26$ mm e $\varnothing_{\text{ext}} = 27,7$ mm, $\varnothing_{\text{int}} = 14,3$ mm.

$$r_d = \frac{\phi_{ext} + \phi_{int}}{2} / 2 \quad \text{Equação 2.4}$$

O raio da pista de desgaste é utilizado no cálculo da distância real percorrida em deslizamento, L (m), através do número de rotações efectuado pelo pino, n_r , segundo a eq. 2.5.

$$L = 2\pi r_d \cdot n_r \quad \text{Equação 2.5}$$

Outro parâmetro é a duração do ensaio, t, sendo calculado pela equação 2.6, a partir da distância percorrida, L. Nesta, t (s) é o tempo de patamar, L (m), a distância de deslizamento e V a velocidade de deslizamento (m/s).

$$t = \frac{L}{V} \quad \text{Equação 2.6}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Determinação do Cálculo Teórico da Pressão Aplicada nas Corrediças e Velocidade de Deslizamento

O cálculo da carga teórica aplicada nas corrediças e a determinação da velocidade de deslizamento das mesmas na guia prismática foram efectuados como seguidamente se descreve:

Dados:

Peso do molde: 15 ton. = 15000 kg

Peso de metade do molde = 7500 kg

Dimensões da corrediça: (150 x 65 x 45) mm

Dois pares de corrediças: quatro superfícies

Distância de deslizamento: 226 mm

Tempo de deslizamento: Fecho do molde: 2,5 s; Abertura do molde: 0,5 s

a)

$$\text{Pressão aplicada em cada corrediça (MPa)} = \frac{\text{Força total aplicada em cada corrediça (N)}}{\text{Área da face de trabalho (mm}^2\text{)}}$$

$$\text{Área da face de trabalho} = 150 \times 65 = 9750 \text{ mm}^2$$

$$\text{Força aplicada em cada corrediça} = \frac{7500}{4} = 1875 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kgf} \rightarrow 9,81 \text{ N}$$

$$1875 \text{ kgf} \rightarrow 18393,75 \text{ N} \rightarrow 18,4 \text{ kN}$$

$$\text{Pressão aplicada} = \frac{18393,75}{9750} = 1,9 \sim 2 \text{ MPa}$$

Nota: O cálculo desta pressão é uma estimativa, numa situação de condição de esforço limite de fecho/abertura, supondo instantes de desalinhamento que obriguem a que as corrediças,

sobretudo as laterais, suportem o peso do molde. Na realidade nem toda a massa do molde é suportada pelas superfícies de deslizamento, sendo alguma parte sustentada pelo sistema estrutural dinâmico de fecho/abertura e pelo próprio meio mecânico de geração de forças de acoplamento/desacoplamento. Apenas um estudo pormenorizado de equilíbrio estático de esforços em cada instante de deslizamento ou um sistema, provavelmente complexo, de monitorização dos esforços nas guias/corrediças para cada etapa evolutiva do deslizamento, por exemplo com o adequado posicionamento de células de cargas, permitiria o rigoroso conhecimento da distribuição de esforços nas referidas superfícies em movimento relativo.

b)

$$\text{Velocidade de deslizamento (m/s)} = \frac{\text{Distância de deslizamento (mm)}}{\text{Tempo de deslizamento (s)}} / 1000$$

$$\text{Velocidade de Fecho} = \frac{226}{2,5} / 1000 = 0,09 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidade de Abertura} = \frac{226}{0,5} / 1000 = 0,45 \text{ m/s}$$

3.2. Estimativa da Força Aplicada pelo Pino para Simulação da Pressão Aplicada nas Corrediças

Pressão aplicada = 2 MPa

$$A_{\text{face do pino}} = \frac{\pi}{4} \times (6,7)^2 = 35,257 \text{ mm}^2$$

$$P = \frac{F}{A} \leftrightarrow F = P \times A \leftrightarrow F = 2 \times 35,257 = 70,51 \text{ N} = 0,07 \text{ kN}$$

3.3. Características das Amostras para Ensaios Tribológicos Pino/Placa

Na tabela 3.1 indicam-se os valores de rugosidade obtidos na empresa para a guia prismática e corrediça e na tabela 3.2 os valores obtidos em laboratório nas amostras para ensaios tribológicos pino/placa.

Tabela 3.1: Valores de rugosidade na guia prismática e corredeia.

Material	Dimensões (mm)	Peso (kg)	Rugosidade (μm)		
			R_a	R_z	$R_{\text{máx.}}$
Guia Prismática	400 x 120 x 65	23,64	Média	0,32	1,95
			Desvio Padrão	0,11	0,53
Corredeia	150 x 65 x 40	3,24	Média	0,43	2,50
			Desvio Padrão	0,10	0,49

Tabela 3.2: Valores de rugosidade nas amostras para ensaio pino/placa.

Material	Dimensões (mm)	Peso (g)	Rugosidade (μm)		
			R_a	R_z	$R_{\text{máx.}}$
Bronze de Alumínio (AMPCO 18) (rectificado sem polimento)	58,4 x 49,2 x 5,7	120,18	Média	0,71	3,87
			Desvio Padrão	0,15	0,48
Bronze de Alumínio (AMPCO 18) (rectificado com polimento)	58,4 x 49,2 x 8,1	151,74	Média	0,32	2,54
			Desvio Padrão	0,09	0,35
Liga de Zinco-Alumínio (ZA-27)	51 x 51 x 8,3	105,48	Média	0,28	2,32
			Desvio Padrão	0,13	1,08
Metal Duro	$\varnothing_{\text{ext}} = 48$	155,64	Média	0,007	0,05
	$\varnothing_{\text{int}} = 34$		Desvio Padrão	0,001	0,01
Ferro Fundido Cinzento	$\varnothing_{\text{ext}} = 46$	69,70	Média	2,194	16,88
	$\varnothing_{\text{int}} = 36$		Desvio Padrão	0,372	3,49
Latão de Alta Resistência	62,8 x 55,6 x 8,0	219,03	Média	0,32	2,52
			Desvio Padrão	0,04	0,26

3.4. Comportamento Tribológico em Ensaio Pino/Placa

3.4.1. Par Tribológico Aço/AMPCO 18 (Rectificado sem Polimento)

A figura 3.1 apresenta o aspecto da placa AMPCO 18 (inicialmente rectificada mas não polida) após ensaio tribológico, e o pino oponente.



Figura 3.1: Pino e placa AMPCO 18 rectificada e não polida após ensaio pino/placa.

Na tabela 3.3 estão representados os resultados do ensaio tribológico pino/placa para o par referido. Ao longo do ensaio, foi variada a carga aplicada, a velocidade de rotação e o tempo de ensaio.

Tabela 3.3: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/AMPCO 18 (rectificado sem polimento).

Etapa	N (kN)	W (rpm)	V (m/s)	t (s)	Σt (h)	L (m)	ΣL (m)	μ médio	K_d (mm ³ .N ⁻¹ .m ⁻¹)	
									Placa	Pino
1	0,01	50	0,055	300	0,08	12,2	12,2	1,493		
2	0,02	100	0,110	300	0,17	38,3	50,5	0,868		
3	0,02	100	0,110	1800	0,67	204,7	255,2	0,975	2,39 x 10 ⁻⁴	*
4	0,03	100	0,110	1800	1,17	204,6	459,8	0,825		
5	0,04	100	0,110	1800	1,67	100,7	560,5	0,716		

* - Não se verificou perda de massa, com quantificação de aumento ligeiro de peso (por transferência/aderência de material e/ou eventual formação de óxidos).

- Para o cálculo do coeficiente de desgaste, foi feita a média das cargas aplicadas em cada etapa.

A etapa inicial (1) iniciou-se com uma carga aplicada de 0,01 kN, velocidade de rotação de 50 rpm (0,055 m/s) para um tempo de ensaio de 300 s (5 min.). Observou-se bom arranque e trabalho contínuo e uniforme de deslizamento. Reparou-se que os dados revelados pelo software, nomeadamente os valores de coeficiente de atrito instantâneo (estes acima da

unidade) não estariam correctos, procedendo-se à paragem do ensaio, para 60% do tempo de ensaio já efectuado.

Procedeu-se a uma calibração da célula lateral de carga, por forma a ser garantida fiabilidade nos valores de atrito medidos.

Na etapa 2, procedeu-se ao aumento da carga para 0,02 kN e velocidade de rotação (50 para 100 rpm). Nesta etapa, deu-se bom arranque do ensaio, acompanhado de medição correcta dos valores do atrito instantâneo. A etapa, prevista para 300 s, foi completada. A etapa 3 foi uma réplica da etapa 2 mas para um tempo de ensaio de 1800 s (30 min.). A etapa foi concluída para o tempo programado. Observou-se um aumento do atrito da etapa 2 para a 3 ($0,87 \rightarrow 0,98$). Nas etapas 4 e 5, mantiveram-se constantes a velocidade de rotação e o tempo de ensaio, variando apenas a carga aplicada (de 0,03 para 0,04 kN). A etapa 4 (figura 3.2) concluiu-se para o tempo programado enquanto que a etapa 5 abortou automaticamente a 50% da etapa por vibração anormal do par, comportamento que até aqui não tinha surgido. Observou-se uma diminuição do atrito médio com o aumento da carga aplicada para as etapas 4 e 5 relativamente à etapa que as precederam (etapa 3), como é mostrado na figura 3.3. De referir que as etapas 3 e 4 foram as mais representativas (maiores tempos, e, portanto, superiores distâncias totais de deslizamento).

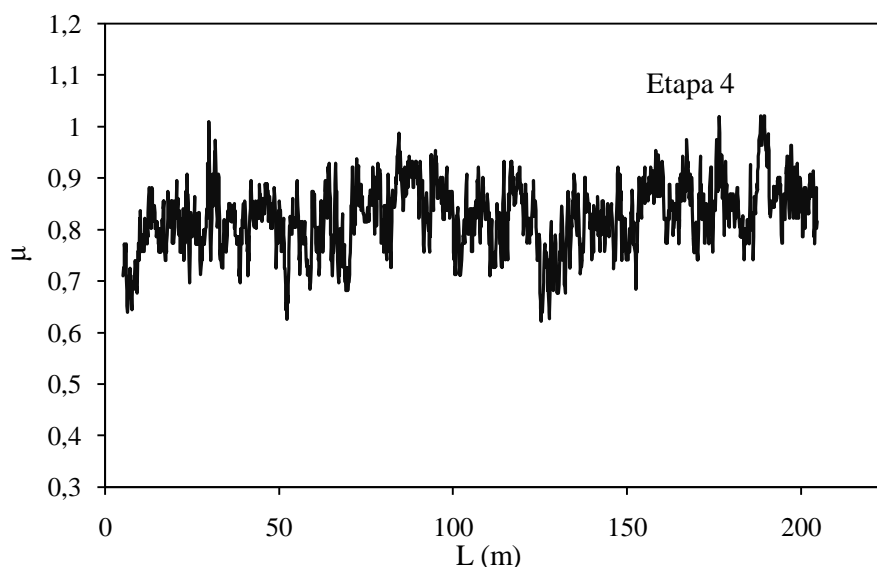


Figura 3.2: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento - Aço/AMPCO 18 (rectificado sem polimento).

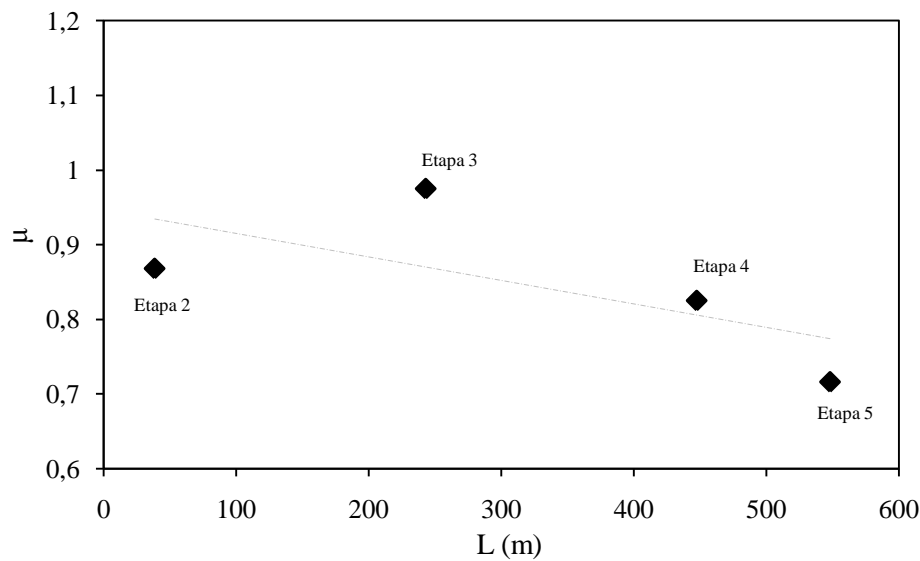


Figura 3.3: Atrito médio em função da distância de deslizamento - Aço/AMPCO 18 (rectificado sem polimento).

Pelo gráfico de μ médio vs L, figura 3.3, podemos observar uma tendência para a diminuição do atrito em função da distância de deslizamento, com o decorrer do sucessivo trabalho mecânico de desgaste, do qual resultou auto-polimento.

O valor do atrito médio registado para a etapa mais representativa, a 4.^a, (figura 3.2) foi de 0,83 com um desvio padrão de 0,07.

O coeficiente de desgaste, K_d , obtido foi de $2,39 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$. O desgaste é severo ($K_d > 10^{-4} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$).¹⁶

Nas figuras 3.4 e 3.5, mostram-se fotomicrografias de SEM feitas à placa AMPCO 18 (rectificada sem polimento). Na figura 3.4 mostra-se o aspecto da zona fora da pista de trabalho, enquanto a figura 3.5 mostra a morfologia da pista de desgaste após o ensaio.

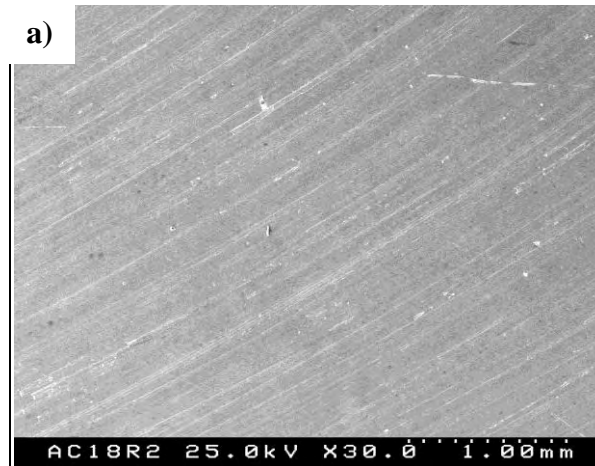


Figura 3.4: Fotomicrografia de SEM da zona fora da pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado sem polimento).

São notórias as marcas de rectificação a que a placa de material foi sujeita.

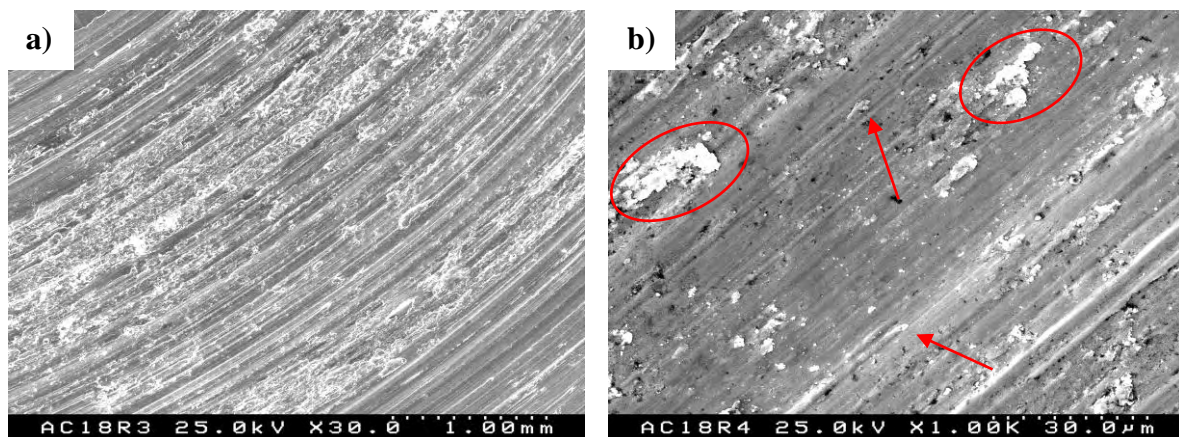


Figura 3.5: Fotomicrografia de SEM da a) pista de trabalho e b) pista de trabalho com maior ampliação para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado sem polimento).

A figura 3.5 mostra o aspecto da pista de desgaste a baixa e maior ampliação. Na figura 3.5.a, a baixa ampliação, é possível observar uma zona de trabalho uniforme. A pista de desgaste apresenta-se sulcada, resultado da abrasão da superfície oponente e das partículas de desgaste. Com maior ampliação, figura 3.5.b, é notória a presença de partículas de desgaste fragmentadas e agregadas à superfície (empastelamentos, contornados pelas elipses). Observam-se também marcas de deformação plástica na superfície desgastada (referenciadas pela setas). Estas fotomicrografias de SEM das superfícies de desgaste, e os efeitos descritos, assemelham-se às encontradas na literatura para estes pares de materiais.^{14,21}

Refira-se que os valores iniciais mais elevados de atrito, podendo dever-se a alguma imprecisão (descalibração) inicial da célula de carga, poderão ter justificação num menos suave e pouco uniforme perfil inicial de rugosidades, o que é corroborado pelos resultados seguidamente obtidos para o mesmo material rectificado mas também polido.

O estudo para a superfície de desgaste do pino mostrou resultados muito semelhantes ao par seguinte, sendo, portanto, aí apresentado.

3.4.2. Par Tribológico Aço/AMPCO 18 (Rectificado com Polimento)

Na figura 3.6, realça-se o aspecto da placa AMPCO 18 rectificada e polida após ensaio, e o respectivo contra pino de aço.



Figura 3.6: Placa de AMPCO 18 (rectificada e polida) e contra pino de aço após ensaio tribológico.

Neste parte, serão apresentados os resultados (tabela 3.4) referentes ao ensaio tribológico deste par. A placa AMPCO 18 foi rectificada e polida até adquirir uma rugosidade semelhante àquela que é utilizada nas corredeiras dos moldes.

Os parâmetros iniciais de carga, velocidade de rotação e tempo de ensaio foram idênticos ao ensaio anterior.

Tabela 3.4: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).

Etapa	N (kN)	W(rpm)	V (m/s)	t (s)	Σt (h)	L (m)	ΣL (m)	μ médio	K_d (mm ³ .N ⁻¹ .m ⁻¹)	
									Placa	Pino
1	0,01	50	0,055	300	0,08	18,1	18,1	0,413		
2	0,02	100	0,110	1800	0,58	54,4	72,5	0,43		
3	0,02	100	0,110	1800	1,08	10,5	83	0,505		
4	0,02	100	0,110	1800	1,58	10,1	93,1	0,618		
5	0,03	100	0,110	1800	2,08	12,6	105,7	0,502		
6	0,03	100	0,110	1800	2,58	52,6	158,3	0,57		
7	0,03	100	0,110	1800	3,08	116,2	274,5	0,614		
8	0,03	100	0,110	1800	3,58	92,0	366,5	0,627	2,82 x 10 ⁻⁴	*
9	0,04	100	0,110	1800	4,08	144,7	511,2	0,588		
10	0,04	100	0,110	1800	4,58	-	-	-		
11	0,04	100	0,110	1800	5,08	31,7	542,9	0,645		
12	0,04	200	0,220	1800	5,58	-	-	-		
13	0,04	200	0,220	1800	6,08	-	-	-		
14	0,04	200	0,220	1800	6,58	-	-	-		
15	0,04	200	0,220	1800	7,08	-	-	-		
16	0,02	200	0,220	1800	7,58	-	-	-		

* - Não se verificou perda de massa, com quantificação de ligeiro aumento de peso (por transferência/aderência de material e/ou com eventual formação de óxidos).

- Paragem automática do tribómetro.

- Para o cálculo do coeficiente de desgaste, foi feita a média das cargas aplicadas em cada etapa.

Na etapa inicial notou-se bom arranque do equipamento e um atrito instantâneo medido muito baixo, $\mu \approx 0,2 - 0,3$. Este atrito oscila consideravelmente pois existiu ligeiro afastamento, por muito baixa reacção sob ínfimo atrito, seguido de aproximação (encosto) à célula de carga, em pontos ou fases de maior atrito. A meio da etapa, ($\approx 50\%$), o atrito instantâneo começou a aumentar para $\mu \geq 0,4$, pois pareceu começar a existir uma fase de maior ruído no deslizamento, indicadores de perturbações à uniformidade do trabalho mecânico. O atrito médio medido nesta etapa foi de 0,41.

Na 2.^a etapa, foram aumentados todos os parâmetros. Observou-se bom arranque e funcionamento com ligeiro ruído e com atrito não muito elevado, $\mu \leq 0,6$. Para $\approx 25\%$ da etapa, notou-se algum ruído apesar do funcionamento ser estável/regular e suave, com movimento e comportamento uniformes. Apesar disso, o equipamento abortou automaticamente o ensaio, não por vibração excessiva, mas por efeito de atrito: o par, repentinamente, sofria um bloqueio automático do seu normal e suave deslizamento, ficando instantaneamente “ancoradas” as duas superfícies opostas. Pode-se tratar de um efeito micro- ou mesmo nano-adesivo generalizado e uniformemente distribuído por toda a área de

trabalho. Tal origina um repentino esforço de rotação, com sobrecarga e uma “pancada” única e repentina sobre a célula de carga, que provoca o encerramento automático do ensaio no tribómetro.

Refira-se, desde já, que a vibração num ensaio de desgaste não lubrificado neste equipamento, e à semelhança do par anterior, não se trata daquele fenómeno de “ancoragem”. A vibração ou é discreta (sob a forma de pancadas aleatórias sob a célula de carga) representando adesões e subsequente descolagens das mesmas juntas durante algum período de trabalho, ou é contínua, apesar de controlada, se houver domínio efectivo do efeito abrasivo e/ou de terceiro corpo entre as faces. Por sua vez em funcionamento estável e estacionário, na ausência de vibração, sendo inevitável o desgaste, os efeitos adesivos e abrasivos (ou outros) sendo também inevitáveis e podendo estar um deles a dominar, são muito mais reduzidos. Já em deslizamento com sinais claros de vibração, eventualmente acompanhada de níveis de ruído característico de cada par de materiais oponentes, um seu limite definido (automaticamente regulado) marca o bloqueio do ensaio por segurança.

Na etapa n.º 3, introduziram-se os mesmos parâmetros da etapa n.º 2, acontecendo nova paragem automática da máquina para $\approx 5\%$, após maior ruído. Já na 4.ª etapa tentou-se repetir a 3.ª, mas sem sucesso. Por isso, na etapa n.º 5 aumentou-se a carga aplicada ($0,02 \rightarrow 0,03$ kN) mantendo os outros parâmetros constantes. Verificou-se bom arranque apesar de algum ruído aleatório, para $\mu \approx 0,6$, e a 4% do patamar o ruído intensificou-se instantaneamente, dando-se bloqueio automático do ensaio. A etapa n.º 6 foi igual à 5, com idêntico arranque, $\mu \approx 0,6$, e baixo ou nulo ruído no patamar. A 23% da etapa, o aparelho bloqueou automaticamente. Na 7.ª etapa repetiram-se os parâmetros da 6.ª, observando-se bom arranque e estável deslizamento na rampa. Notaram-se alguns ruídos de forma aleatória, e a $\approx 67\%$ do patamar, num maior pico de ruído, o aparelho voltou a parar, novamente sem qualquer sinal, contínuo ou aleatório, de vibração ou da referida “pancada”.

Antes da próxima etapa procedeu-se a recolha dos resíduos e limpeza da face de trabalho com acetona. Já na etapa n.º 8, repetição da anterior, começaram a formar-se novos resíduos e para $\approx 30\%$ (perto dos 70 m) do patamar, ocorreram fortes ruídos com registo de picos de atrito. A formação de resíduos e posterior aglomeração, parecem contribuir para o incremento do número dos ruídos aleatórios e da sua amplitude. Com baixas velocidades, como é o caso, os resíduos não são potencialmente expelidos por centrifugação do contacto aberto, onde o não recobrimento ou fecho total facilitaria essa eliminação dinâmica. Tal

provoca menos ruído, mas quando acontece é mais forte. Para 44% do patamar o ensaio abortou de forma automática.

Na 9.^a etapa aumentou-se a carga para 0,04 kN. O atrito médio verificado foi de 0,59, com um desvio padrão de 0,05. Esta etapa foi a mais significativa: aqui, e pelo mesmo motivo, o aparelho só abortou para 69% da etapa.

Os mesmos parâmetros (carga, velocidade de rotação e tempo) foram introduzidos na etapa n.º 10. O aparelho bloqueou logo pós o arranque. Procedeu-se então à remoção dos resíduos e limpeza das faces de trabalho com acetona.

Na etapa n.º 11 e para os mesmos parâmetros da anterior, ocorreu bom arranque mas com algum ruído mais ou menos contínuo. Sem resíduos, como foi o caso desta etapa, o ruído foi baixo, mas mais contínuo. Para $\approx 13\%$ da etapa, já com alguns resíduos formados, deu-se novo pico de forte ruído e bloqueio automático.

Na etapa n.º 12, aumentou-se a velocidade de rotação, de 100 rpm (0,110 m/s) para 200 rpm (0,220 m/s), mantendo as restantes variáveis constantes. Quase logo após o arranque ocorreu um bloqueio imediato, eventualmente já com algum dano (início de gripagem) no par, também aqui concluído pela antevisão do comportamento das etapas seguintes: na 13.^a tentou-se repetir n.º 12, repetindo-se o bloqueio para 44% da etapa; o mesmo se passou para a etapa n.º 14; de seguida, 15.^a etapa, limpam-se os resíduos e tentou-se repetir a etapa 12, onde, mesmo sem efeito dos resíduos, houve algum ruído e o par gripou para 5% da etapa, não se chegando a formar novos resíduos; na etapa n.º 16, reduziu-se a carga (0,04→0,02 kN), e o atrito medido foi baixo, mas com ruído que levou à paragem/gripagem do par logo no início do patamar.

Neste par o coeficiente de desgaste avaliado foi de $K_d = 2,82 \times 10^{-4} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$. Para este mesmo ensaio, nas figuras 3.7 e 3.8 estão representados, respectivamente, os gráficos do atrito instantâneo (da etapa mais representativa) e do atrito médio em função da distância de deslizamento.

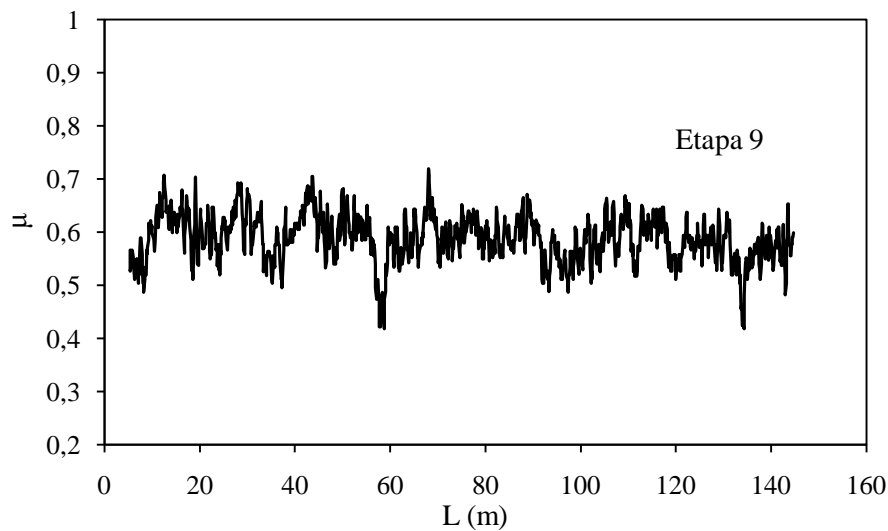


Figura 3.7: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).

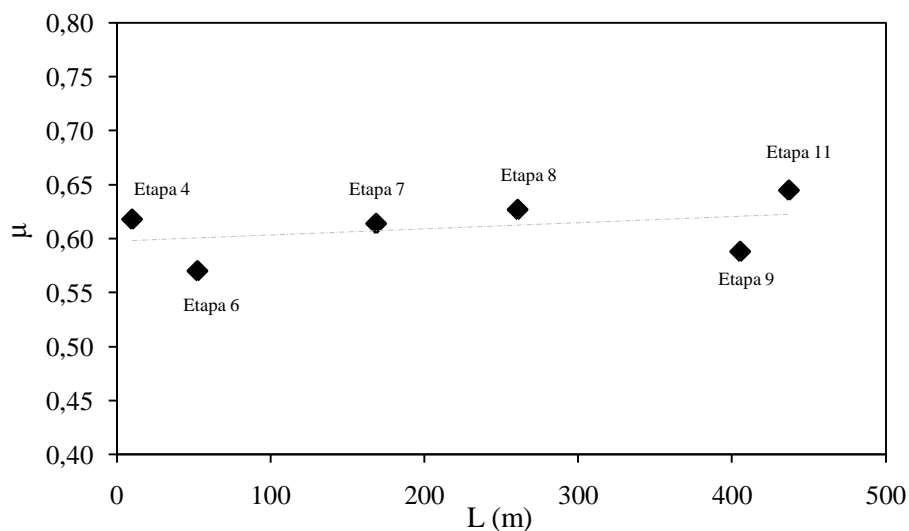


Figura 3.8: Atrito médio em função da distância de deslizamento para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).

Pelo gráfico do atrito médio vs distância de deslizamento, observa-se uma tendência crescente do atrito ao longo das etapas, com algum pendore de estabilização para um valor médio de 0,60. Fazendo um cálculo da média dos coeficientes de atrito ao longo dos ensaios tribológicos para a placa AMPCO 18, rectificada e sem polimento, e para a AMPCO 18 rectificada com polimento, com distâncias totais de deslizamento de 560,5 m e 542,9 m, respectivamente, chega-se a valores de atrito de $\mu = 0,85$ e $\mu = 0,55$. Estes valores sugerem vantagem no polimento inicial das faces de trabalho, demonstrando a influência dos níveis iniciais de rugosidade nos valores de atrito. As tendências antagónicas na evolução do atrito

(decréscimo no caso sem polimento e o oposto no ensaio com bronze polido), confirmam aquela sugestão. Por sua vez, no ensaio de deslizamento a seco deste materiais e partindo de superfícies antagónicas topograficamente optimizadas (reduzida rugosidade e boa planeza), as degradações na pista e aderências ao pino, seguidamente descritas, resultam no referido prejuízo de acréscimo no coeficiente de atrito.

Efectuou-se análise microscópica de SEM à pista de trabalho deste ensaio. Na figura 3.9 está representado o aspecto da zona fora da pista de desgaste a várias ampliações.

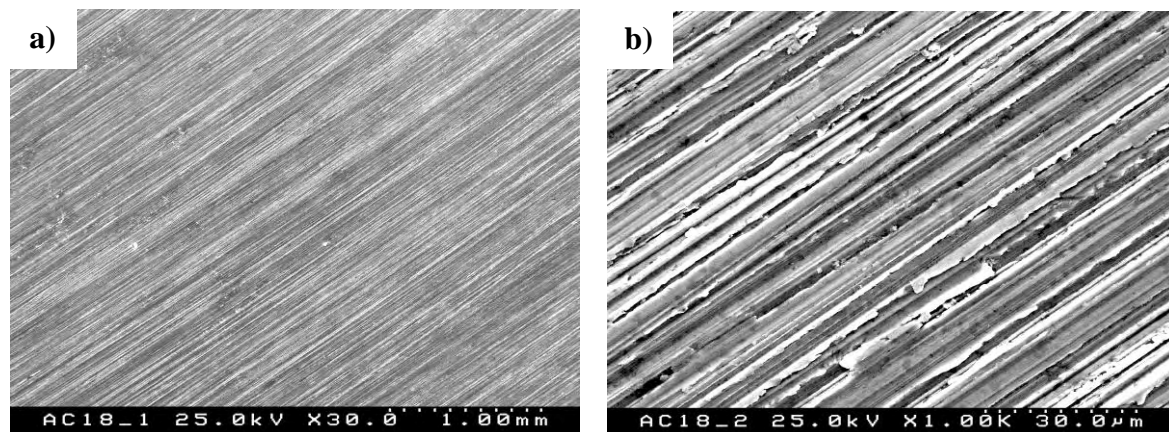


Figura 3.9: Fotomicrografias de SEM da a) zona fora da pista de trabalho e b) uma sua maior ampliação para a placa AMPCO 18 (rectificada e polida).

A baixa ampliação, é possível observar as marcas de polimento deixadas na placa pelas lixas de SiC. Na maior ampliação são notórios os sulcos finos efectuados pelas partículas duras de SiC. Sob regime de desgaste suave, com o polimento com abrasivos macios e finos, ocorre abrasão por deformação plástica, uma vez que os pequenos sulcos formados não originam fractura. Este é considerado um regime dúctil de desgaste, sem indentação e onde o avanço de tensões e/ou pequenos ciclos de fadiga controlam o desgaste, com formação de fragmentos delaminados por fractura frágil após deformação plástica e pequenas fendas subsuperficiais.⁴⁷

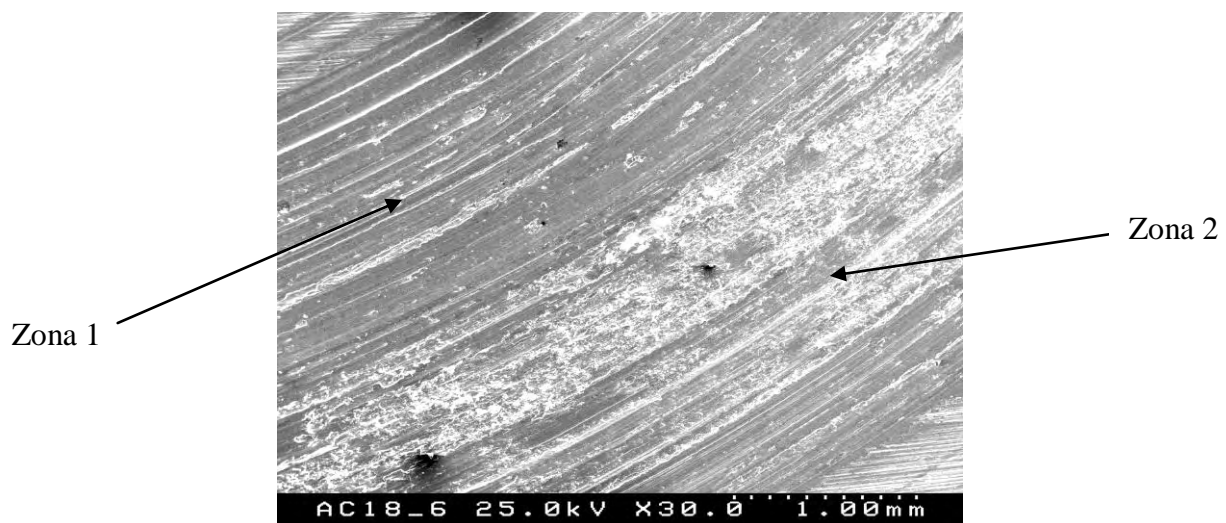


Figura 3.10: Fotomicrografia de SEM da zona da pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).

Na fotomicrografia da figura 3.10, é possível observar claramente os limites da pista de desgaste, bem como duas zonas distintas, uma mais polida (zona 1) e uma mais rugosa (“empastelada”) com maior aderência de material (zona 2). A superfície apresenta-se sulcada devido à maior dureza do aço do pino. Na figura 3.11 encontra-se fotomicrografias de SEM das zonas 1 e 2 com ampliação.

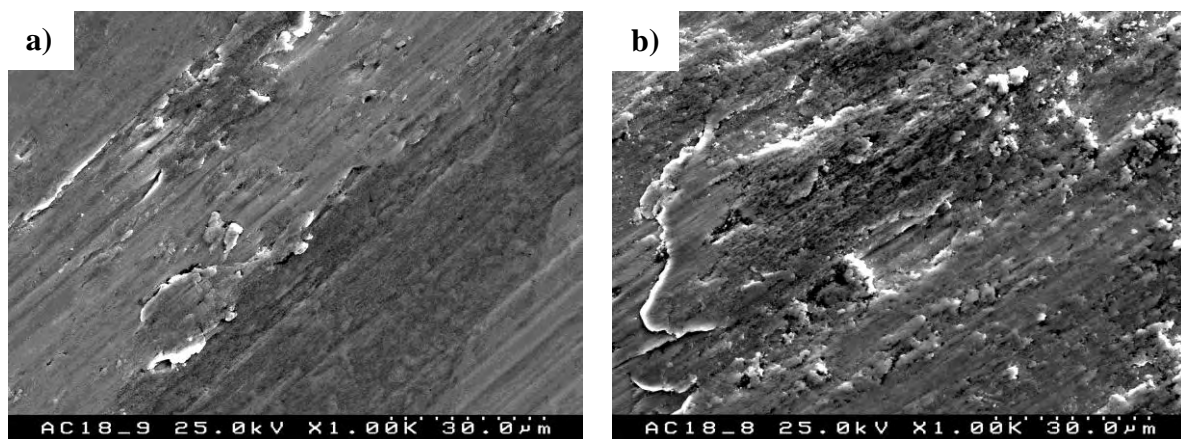


Figura 3.11: Fotomicrografias de SEM da zona a) mais e b) menos polida da pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).

São visíveis as diferenças de rugosidade entre as duas imagens: a zona 2 (fig. 3.11.b) apresenta-se mais sulcada em relação à zona 1 (fig. 3.11.a); na figura 3.11.b nota-se a elevada

rugosidade resultante da fragmentação e empastelamento das partículas de desgaste na placa AMPCO 18.

Foi igualmente feita análise de SEM ao pino usado neste ensaio, imagem da figura 3.12.

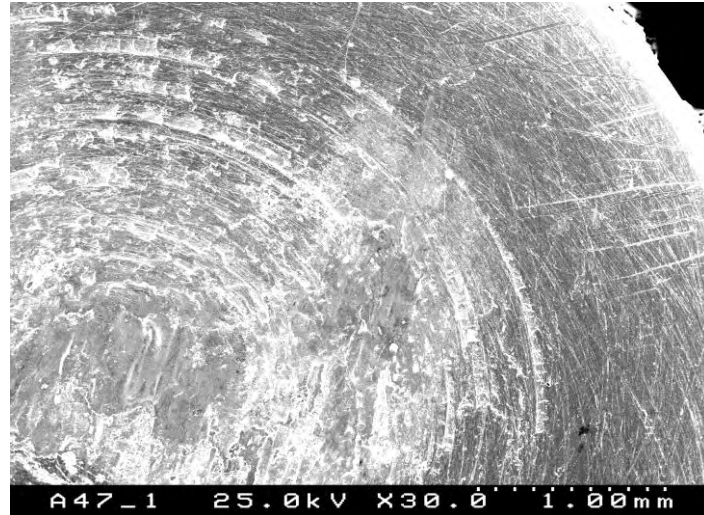


Figura 3.12: Fotomicrografia de SEM da face do pino para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).

Pela fotomicrografia da figura 3.12, observa-se que o pino não realizou trabalho na sua periferia. Isto ficou a dever-se à ovalidade do pino após polimento. No centro do pino, é visível a rugosidade e a aderência de material da placa AMPCO 18, permitindo concluir que esta foi a zona de maior trabalho. Na figura 3.13 vêem-se fotomicrografias com ampliação da zona mais central e da zona mais exterior do pino. É possível ver que a zona mais central (figura 3.13.a) apresenta maior rugosidade e aderência de material, relativamente à zona mais exterior (figura 3.13.b).

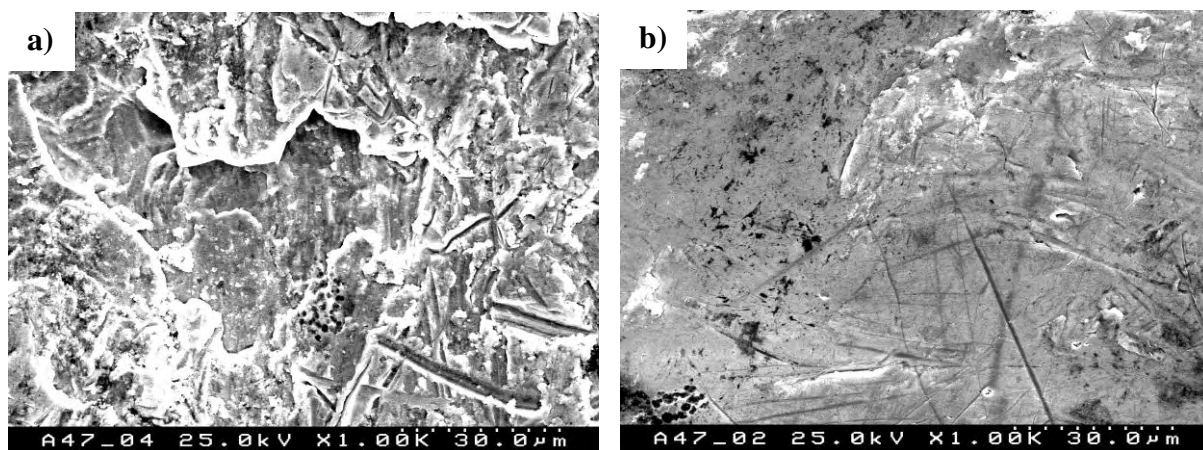


Figura 3.13: Fotomicrografias de SEM da a) zona central do pino e b) orla exterior do pino para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).

Este facto é comprovado pela análise de EDS feita nas duas zonas do pino, zona central e zona exterior (periférica), figuras 3.14 e 3.15, respectivamente.

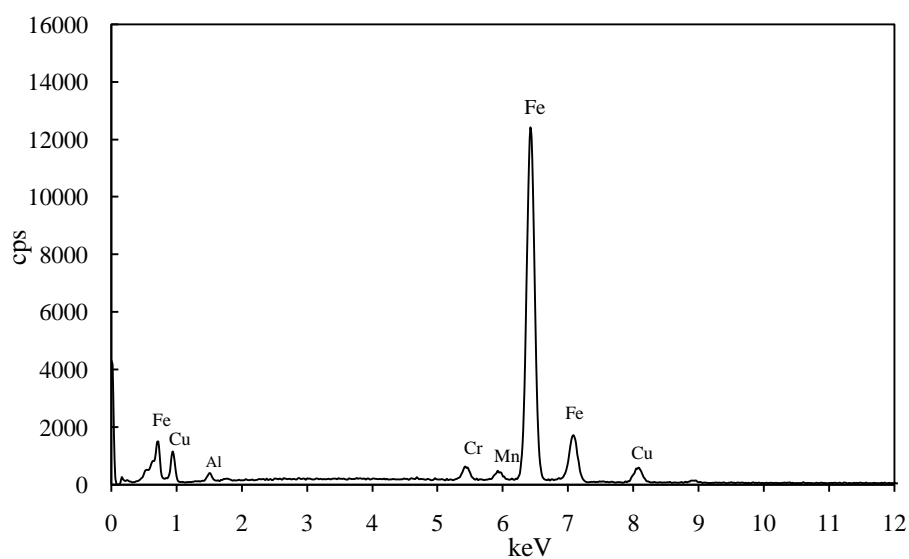


Figura 3.14: Espectro de EDS da zona central do pino para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).

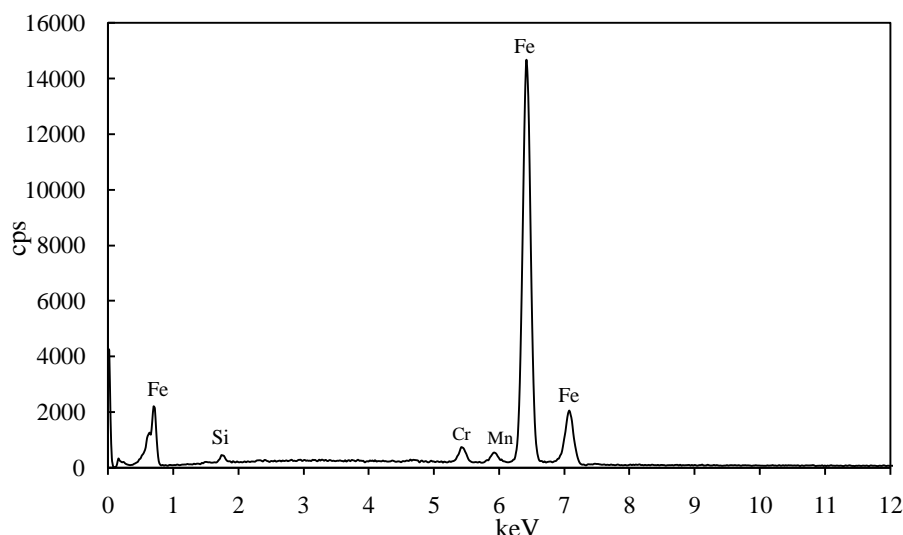


Figura 3.15: Espectro de EDS da zona periférica do pino para o par Aço/AMPCO 18 (rectificado e polido).

Pelo espectro de EDS da figura 3.14, é visível a existência de picos de cobre e alumínio juntamente com os elementos do aço do pino, corroborando a ideia da transferência/adesão de material da placa AMPCO 18 para o pino. Pelo contrário, na zona mais exterior do pino, a análise EDS (figura 3.15) efectuada não detectou a presença de nenhum elemento constituinte da placa AMPCO 18. Este é mais um facto que comprova que essa zona não realizou trabalho, devido à explicação acima referida.

Nos provetes não foram detectadas fases que pudessem afirmar certezas sobre terem sido atingidas condições de activação química, no sentido da promoção de reactividade com formação de terceiro corpo aderente e protector, óxidos, etc.. Na bibliografia destes materiais/contactos, também não se encontram registos destas formações. Os fenómenos de aderência à superfície do pino são então caracterizados por adsorção física ou mesmo química. As baixas cargas e velocidades dos ensaios não promovem fenómenos térmicos nem se promove a deformação da rede cristalina (via mecânica e ou termomecânica).

3.4.3. Par Tribológico Aço/AMPCO 608 Grafitado

Neste sub-capítulo é abordada a resposta tribológica do par aço/AMPCO 608 com impregnação de grafite.

A figura 3.16 mostra o aspecto do bronze de alumínio grafitado e respectivo pino de aço, após ensaio.



Figura 3.16: Placa AMPCO 608 grafitado e contra pino de aço após ensaio tribológico.

Na etapa inicial, os parâmetros introduzidos na máquina foram iguais aos ensaios anteriores, ou seja, $N = 0,01$ kN, $W = 50$ rpm e $t = 300$ s. Nesta primeira etapa, observou-se bom arranque e estabilidade mas com nulo atrito medido, por nula reacção na célula de carga. Na etapa n.º 2, aumentou-se a carga para 0,02 kN e a velocidade para 100 rpm. Novamente, o arranque foi bom com perfeita estabilidade. Nesta etapa, continuando-se a verificar nula reacção na célula de carga, o coeficiente de atrito resultante foi igualmente de zero. Já na 3.ª etapa aumentou-se o patamar para 1800 s, verificando-se o mesmo comportamento das anteriores.

Na etapa n.º 4, aumentou-se a carga (0,02→0,03 kN), mantendo os outros parâmetros. Nesta etapa, verificou-se o início da medida, com μ instantâneo não nulo, apesar de algumas flutuações onde a acção/reacção era ínfima. O atrito médio desta etapa foi de 0,059, $\approx 0,06$.

Na etapa n.º 5, a carga aplicada foi de 0,04 kN. Notou-se que o atrito foi crescendo de etapa para etapa, agora já ligeiramente acima de 0,08, com a célula de carga a traduzir os valores de atrito, mas com algumas flutuações.

Na etapa seguinte, aumentou-se novamente a carga (0,04→0,05 kN). Nesta etapa, o atrito médio baixou para $\approx 0,08$, com diminuição dessas flutuações.

Na etapa n.º 7, houve novo incremento de carga para 0,06 kN. Observou-se bom arranque e funcionamento estável, como nas etapas anteriores. O atrito aumentou ($\mu \geq 0,08$) e por vezes notou-se algum ruído pontual. Para o meio/fim da etapa, o ruído pareceu ser mais contínuo.

Nas etapas n.º 8 e n.º 9 aumentou-se a carga para 0,07 kN e 0,08 kN, respectivamente. As etapas decorreram de forma estável com valores de atrito médio idênticos ($\mu = 0,09$), como se pode observar pela tabela dos resultados globais (tabela 3.5).

Na 10.ª e última etapa, voltou-se novamente a aumentar a carga para 0,09 kN. Além do aumento do atrito, observou-se um aumento de ruído que pode levar à gripagem do par. No final da etapa programada, recolheram-se os resíduos, bem como as amostras ensaiadas.

Na figura 3.17 encontra-se representado o gráfico do atrito instantâneo em função da distância de deslizamento, para uma etapa aleatória, no caso a 8.ª. O atrito médio desta etapa foi de 0,09, com um desvio padrão de 0,01. Na figura 3.18 está representado o gráfico do atrito médio. Pelo gráfico, pode-se observar que o atrito aumentou, com tendência para estabilizar a partir da etapa 6. A principal razão para os valores de atrito serem baixos comparativamente aos outros pares atrás mencionados, deve-se à acção lubrificante dada pela grafite. As ligações fracas de Van-der-Waals entre camadas são quebradas à medida que o ensaio ocorre, devido à pressão e forças de corte geradas, fazendo com que o filme de grafite se deposite na forma de lubrificante sólido na superfície de deslizamento. O coeficiente de desgaste foi de $K_d = 3,86 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$, sugerindo desgaste moderado ($K_d \approx 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$).¹⁶ Este valor está de acordo com o encontrado na literatura.¹⁰

Na figura 3.19 são mostradas as fotomicrografias de SEM da zona fora da pista de trabalho da placa AMPCO 608 grafitado a baixa e maior ampliação. A amostra possui sujidade depositada na superfície e está oxidada, como é possível observar na fotomicrografia de maior ampliação (figura 3.19.b).

Tabela 3.5: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/AMPCO 608 grafitado.

Etapa	N (kN)	W (rpm)	V (m/s)	t (s)	Σt (h)	L (m)	ΣL (m)	μ médio	Kd (mm ³ N ⁻¹ m ⁻¹)	
									Placa	Pino
1	0,01	50	0,055	300	0,08	33,2	33,2	-		
2	0,02	100	0,110	1800	0,58	71,4	104,6	-		
3	0,02	100	0,110	1800	1,08	370,3	474,9	-		
4	0,03	100	0,110	1800	1,58	371,5	846,4	0,059		
5	0,04	100	0,110	1800	2,08	371,6	1218	0,086	3,86 x 10 ⁻⁵	*
6	0,05	100	0,110	1800	2,58	370,0	1588	0,08		
7	0,06	100	0,110	1800	3,08	370,4	1958,4	0,086		
8	0,07	100	0,110	1800	3,58	369,2	2327,6	0,087		
9	0,08	100	0,110	1800	4,08	369,7	2697,3	0,085		
10	0,09	100	0,110	1800	4,58	369,6	3066,9	0,088		

* - Não se verificou perda de massa, com quantificação de aumento de peso (por transferência/aderência de material e/ou com eventual formação de óxidos).

- Ausência de reacção na célula de carga (nulo atrito medido).

- Para o cálculo do coeficiente de desgaste, foi feita a média das cargas aplicadas em cada etapa.

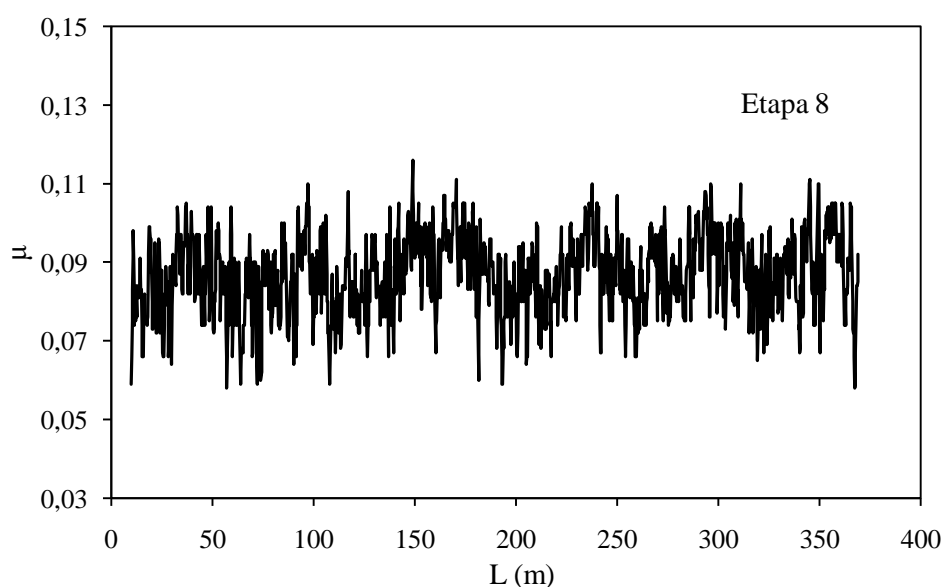


Figura 3.17: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

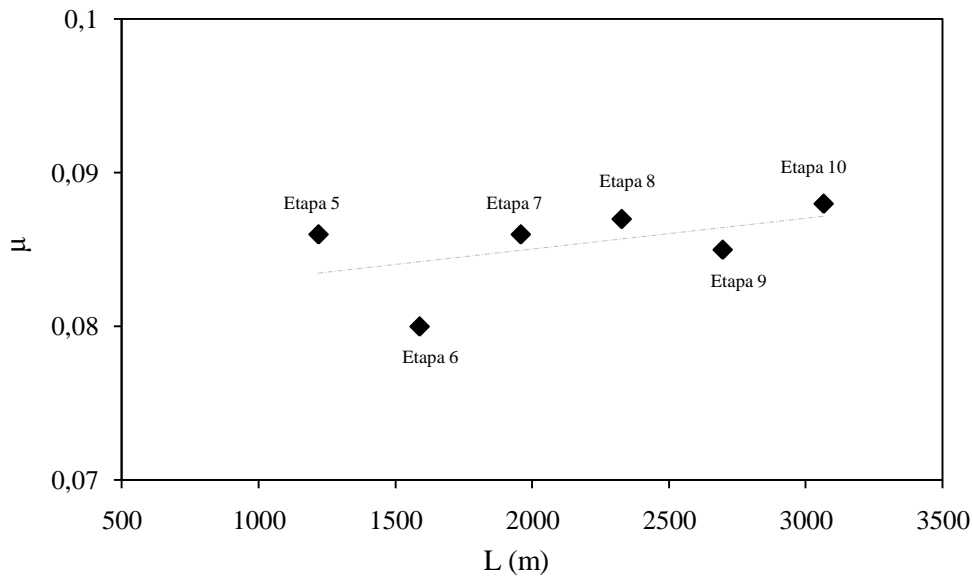


Figura 3.18: Atrito médio em função da distância de deslizamento para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

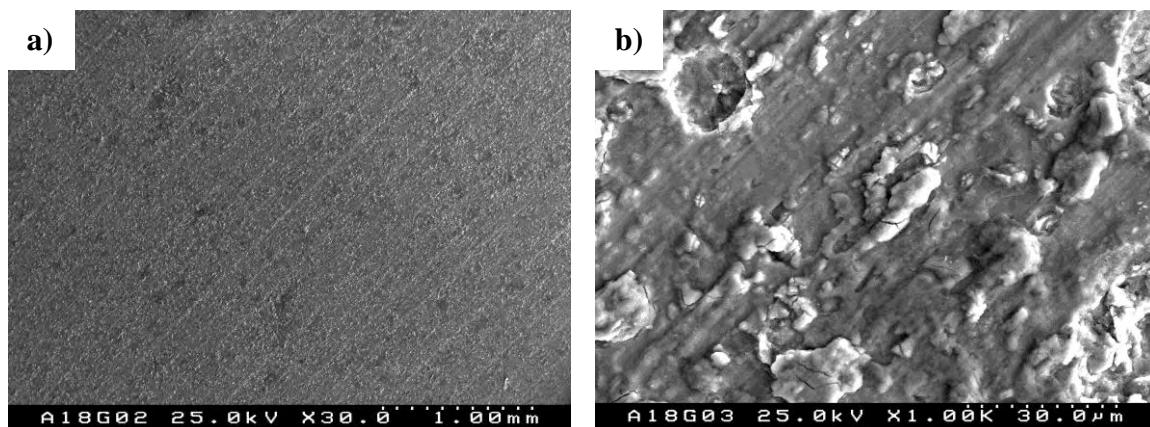


Figura 3.19: Fotomicrografias de SEM da a) zona fora da pista de trabalho e b) uma sua maior ampliação para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

Na figura 3.20 mostram-se as fotomicrografias de SEM da zona interior da pista de trabalho a baixa e maior ampliação. A fotomicrografia da fig. 3.20.a diz respeito à zona de desgaste que antecede a entrada na zona de impregnação da grafite. Como se observa, esta não é totalmente perceptível, sugerindo desgaste mínimo e eficácia por parte do filme de grafite depositado na superfície de deslizamento. Na fotomicrografia de maior ampliação (fig 3.20.b), notam-se alguns sulcos efectuados pela superfície oponente na parte metálica.

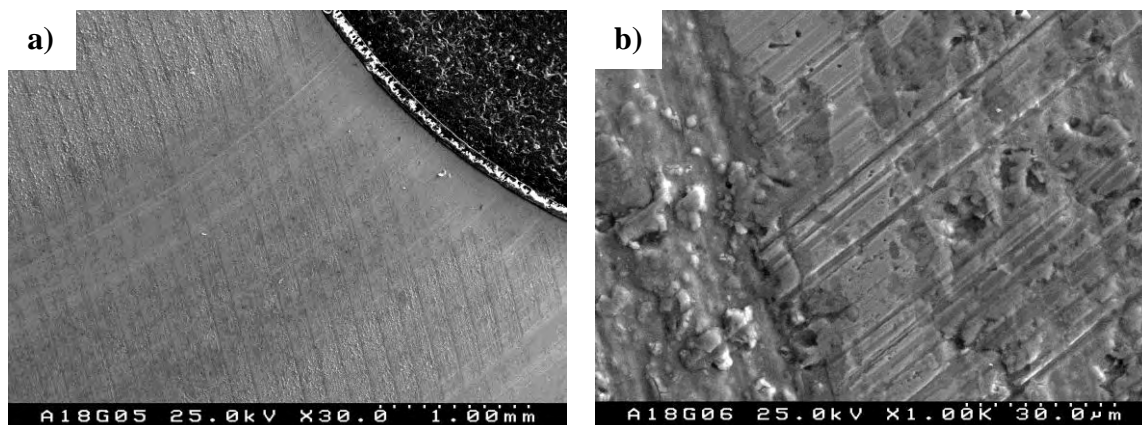


Figura 3.20: Fotomicrografias de SEM da a) zona interior da pista de trabalho e b) uma sua maior ampliação para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

Na figura 3.21 evidencia-se a interface metal/grafite (fig 3.21.a) e o aspecto do interior da grafite. Na fig 3.21.a é possível observar ligeiras marcas da passagem do pino de aço antes de entrar na zona da grafite. É também visível o depósito de material (partículas de desgaste) na interface metal/grafite.

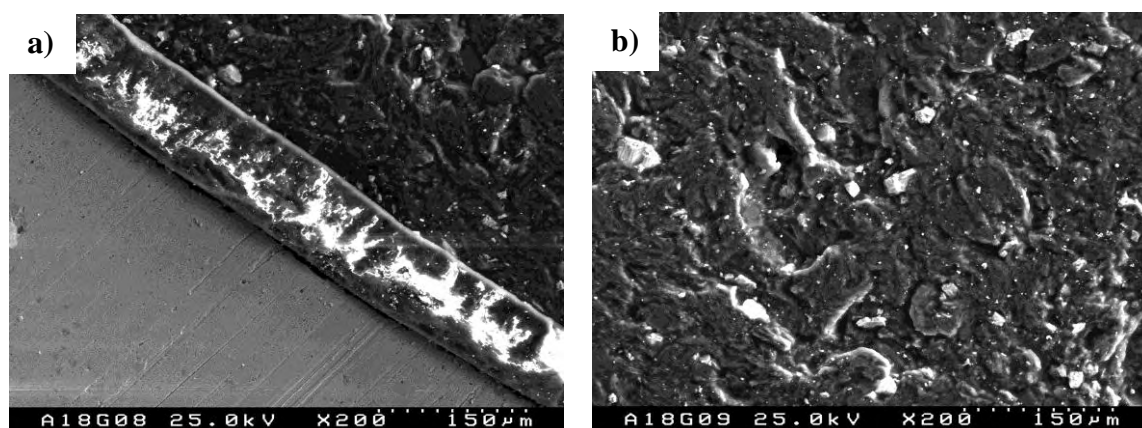


Figura 3.21: Fotomicrografias de SEM da a) zona da interface metal/grafite e b) zona interior da grafite para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

Foi efectuada uma análise de EDS na superfície de desgaste antes de entrar na zona de impregnação de grafite (fig. 3.22), no interior da grafite (fig. 3.23) e à saída da mesma (fig. 3.24).

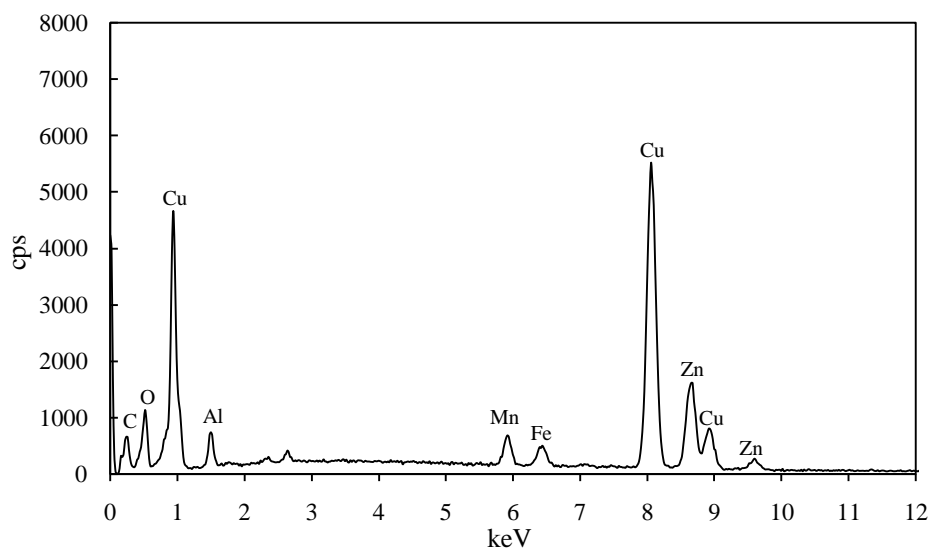


Figura 3.22: Espectro de EDS da zona metálica “pré-grafite” na pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

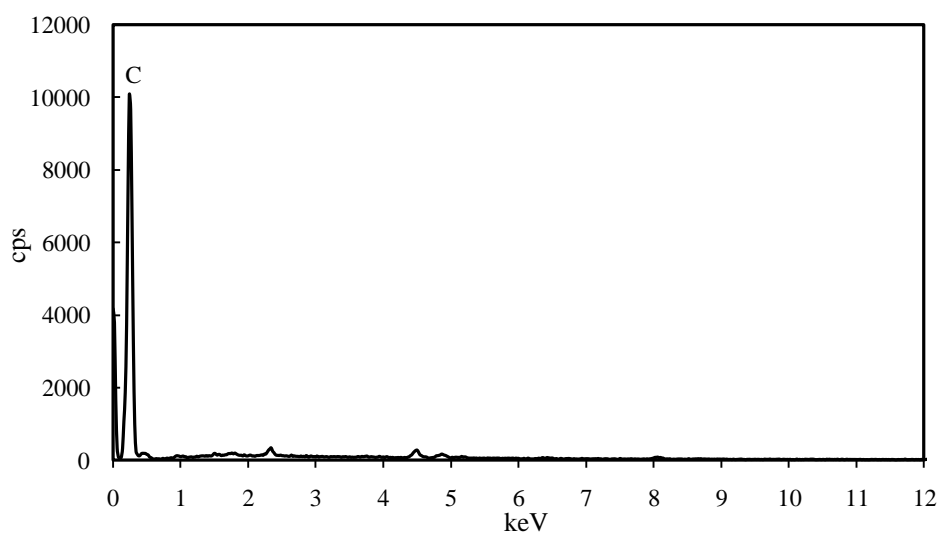


Figura 3.23: Espectro de EDS da zona da grafite na pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

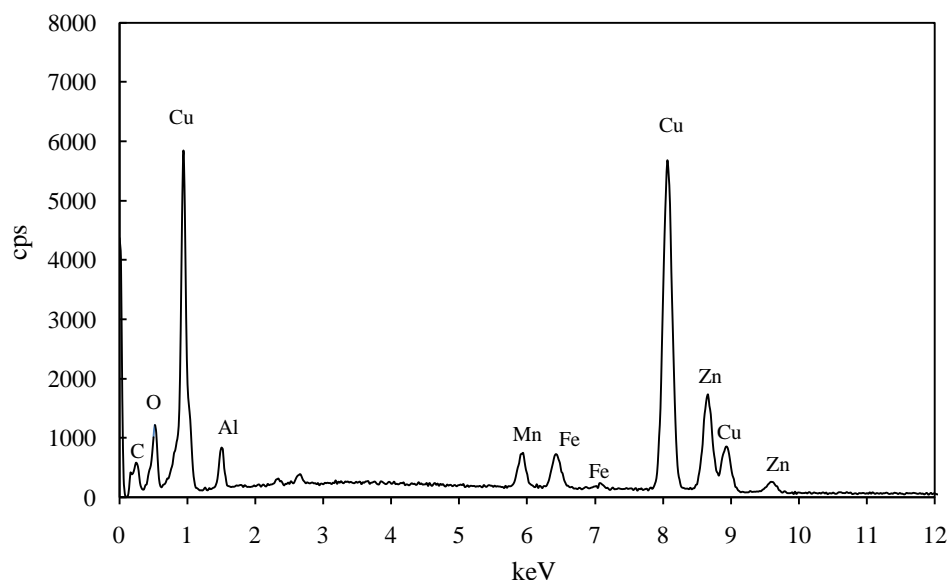


Figura 3.24: Espectro de EDS da zona metálica “pós-grafite” na pista de trabalho para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

Para além dos constituintes principais do AMPCO 608, é visível nos espectros EDS das figuras 3.22 e 3.24 o pico de oxigénio. O pico de oxigénio poderá ser proveniente do estado de oxidação a que a superfície se encontra, ilustrado na fotomicrografia SEM da fig. 3.19b. O espectro EDS referente à zona da grafite (fig. 3.23) apenas detecta o pico de carbono, como seria de esperar. Neste espectro não se detectou a presença do pico de oxigénio. Isto permite tirar uma ilação sobre a diferença de oxidação da superfície, com tendência de formação de óxidos na parte metálica relativamente à parte da grafite, com menor tendência de oxidação.

A fotomicrografia da fig. 3.21.b mostra o aspecto da grafite impregnada na placa AMPCO 608. Não se detecta destruição aparente da superfície da grafite. Denota-se alguma sujidade e partículas soltas de desgaste.

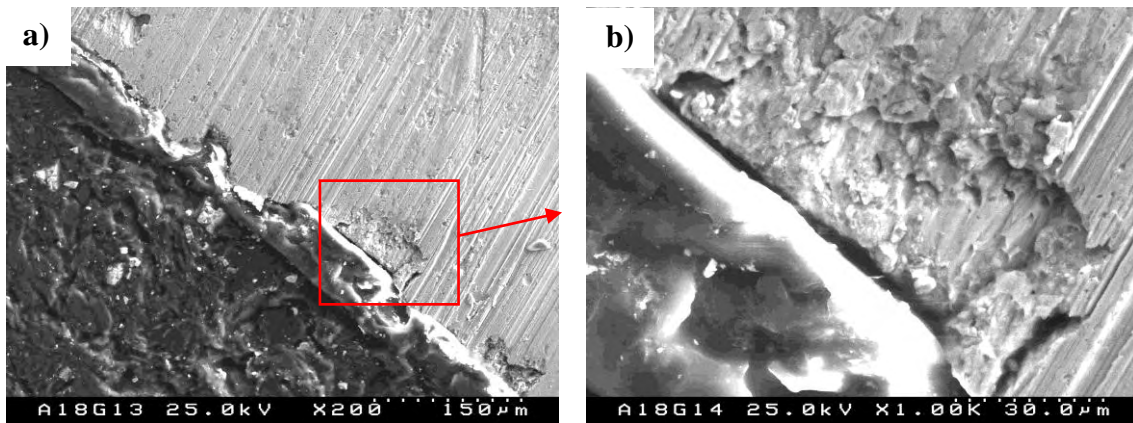


Figura 3.25: Fotomicrografias de SEM da a) interface grafite/metal e b) sua maior ampliação para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

Na fotomicrografia SEM da figura 3.25, apresenta-se a interface grafite/metal. Na fig. 3.25.a é mostrado o trajecto efectuado pelo pino na saída da zona da grafite e a entrada na parte metálica. É notória a superfície ligeiramente sulcada e a direcção de deslizamento. A figura 3.25.b mostra a interface com maior ampliação, onde se observa um possível arrancamento de material feito pela acção do pino ao passar naquela zona.

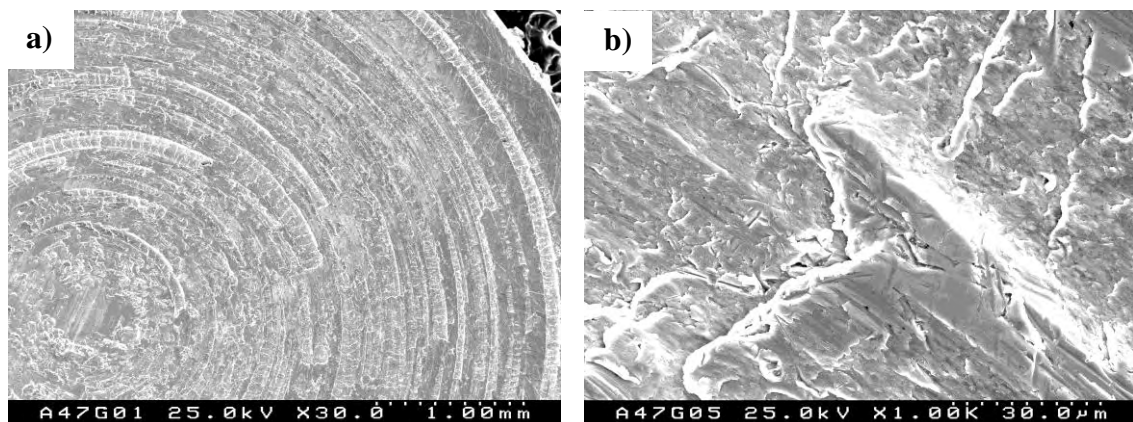


Figura 3.26: Fotomicrografias de SEM da a) vista parcial do pino e b) zona afastada do centro do pino com ampliação para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

Na figura 3.26, mostra-se o aspecto do pino usado neste ensaio. Na figura 3.26.a observa-se que toda a face do pino exerceu trabalho. Na fotomicrografia de SEM da figura 3.26.b com maior ampliação, observam-se sinais de transferência/adesão de material ao pino, que é comprovada por análise de EDS (figura 3.27). Pelo espectro de EDS, observam-se picos, embora de pouca intensidade, de alumínio e cobre, comprovando a existência de transferência de material da placa para o pino.

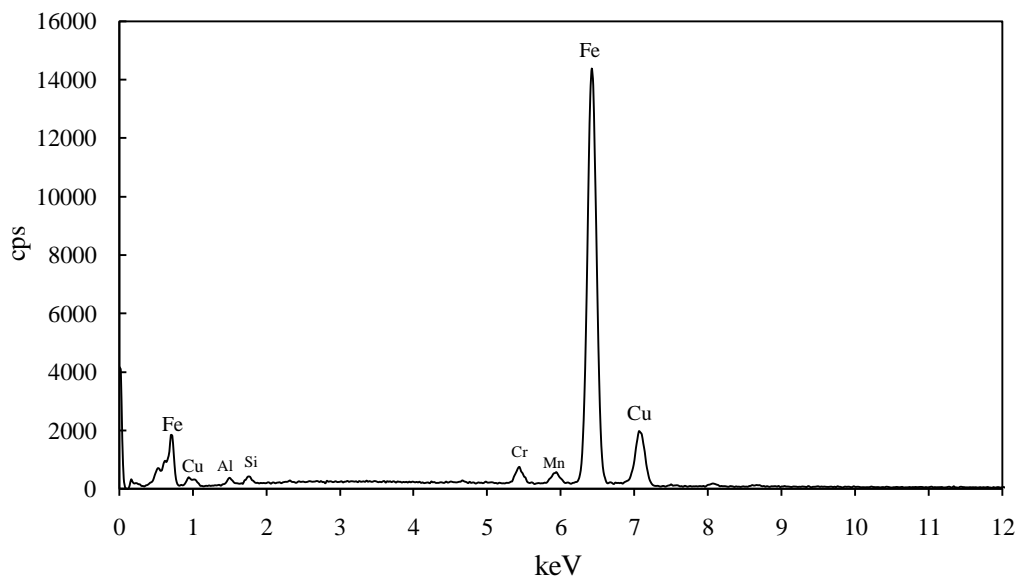


Figura 3.27: Espectro de EDS da face do pino para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

Posteriormente, foi efectuado um ensaio com o mesmo par tribológico com duração de 3 horas (10800 s). A condição da etapa foi: 0,04 kN, 100 rpm, 10800 s.

Na figura 3.28 está representado o respectivo gráfico de μ instantâneo vs L. Refira-se que a aquisição de dados no tribómetro, feita ao segundo, poderia ou deveria, neste caso, ter sido alterada para maiores tempos, o que evitaria a densidade de linhas e a própria apresentação desse gráfico. Mesmo na construção gráfica poder-se-ia eliminar parte desses pontos. Tal não foi feito, por ser, neste trabalho, dos únicos gráficos deste tipo e para se revelar alguma uniformidade de comportamento em deslizamento do par, sem picos abruptos de coeficiente de atrito.

Neste ensaio, o raio da pista de desgaste foi maior (por razões técnicas de montagem/fixação experimental e pela própria amostra AMPCO 608 que foi utilizada). Este facto originou muito menor acção de auto-lubrificação por parte da grafite, já que o pino não exerceu tanto trabalho sobre a grafite como no ensaio anterior, incidindo mais na parte metálica. Como se verifica pelo gráfico, os valores de μ ficaram próximos do ensaio do par tribológico Aço/AMPCO 18 rectificado e polido do subcapítulo 3.4.2..

Observa-se que no início se verifica uma clara fase de rodagem, atingindo-se um regime estacionário com valor médio de $\mu = 0,5$. Neste funcionamento estável, apesar da razão de passagem em recobrimento do pino sobre nódulos de grafite ser muito menor que nas etapas prévias deste ensaio, o poder auto-lubrificante do par foi suficiente para, garantir um valor de atrito consideravelmente mais elevado ($\approx 0,5$) quando comparado com os

anteriores ($\approx 0,08$), resultando uma acção mecânica regular suave, funcionamento estável e portanto, numa dinâmica global de deslizamento, não lubrificado por qualquer agente externo, muito uniforme.

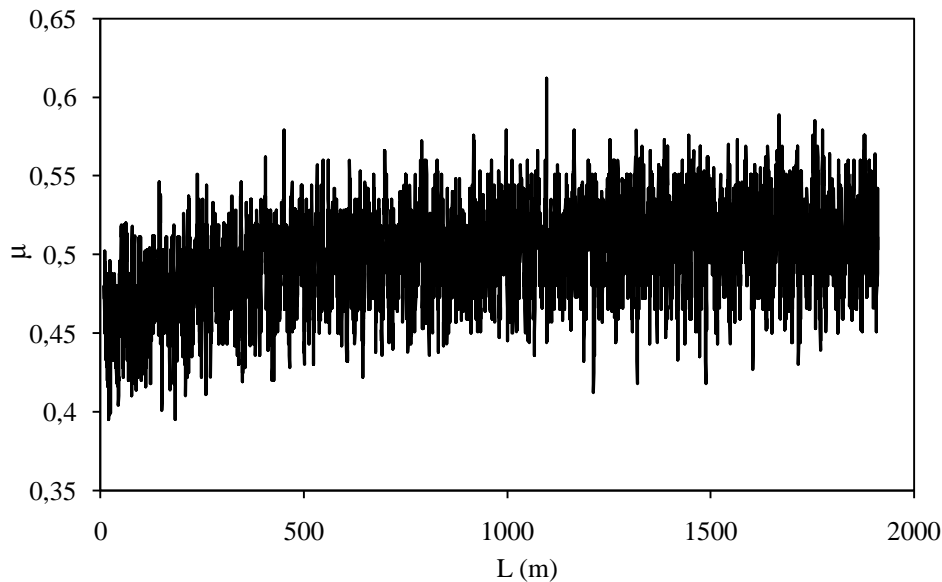


Figura 3.28: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/AMPCO 608 grafitado.

3.4.4. Par Tribológico Aço/ZA-27

A primeira tentativa de teste de um material com vista à possibilidade de substituição do AMPCO utilizado nos moldes, foi o ensaio com a liga de zinco-alumínio (ZA-27). Na figura 3.29 encontra-se o aspecto da amostra de ZA-27 e o oponente de aço logo após a realização do ensaio tribológico, e na tabela 3.6 são apresentados os respectivos resultados obtidos.



Figura 3.29: Placa ZA-27 e contra pino de aço após ensaio tribológico.

Este ensaio começou com os parâmetros iguais aos ensaios anteriores, de modo a permitir comparação. Assim, na etapa inicial, para $N=0,01$ kN, $W=50$ rpm e patamar de 300 s, o atrito medido pela célula de carga começou por ser baixo e com sinais de algum ruído aleatório. Na fase de 50% a 75% da etapa, deu-se aumento gradual do atrito (com $\mu \geq 0,8$) e com emissão de forte ruído. Notou-se a formação de bastante limalha (resíduos), e uma considerável marca da pista de trabalho/desgaste na placa ZA-27.

Na etapa n.º 2 alterou-se o tempo de ensaio para 1800 s, mantendo-se constantes as outras variáveis. Observou-se igual comportamento, com elevados valores de atrito ($\mu \geq 0,9$), formação de bastantes resíduos e ruído característico de gripagem mas a surgir de modo aleatório (i.é, não contínuo, com emissões de 5 em 5 minutos, aproximadamente). A 75% desta etapa, o atrito atingiu valores mais elevados, na ordem de $\mu \approx 1,5$, quer aumentando até este valor, quer diminuindo, mas sempre acima de 1,0. Constatou-se uma tendência para a gripagem do par, denotando-se muitos danos na pista, algumas adesões e desprendimentos (com ligeiras pancadas sobre a célula de carga) e, por volta dos 90-95% da etapa, notou-se uma ainda mais forte variação do atrito. Após esta etapa, os resíduos foram recolhidos, resíduos que ficaram muito soltos sobre a placa, não se observando adesão macroscópica de material ao pino.

Foi efectuada posteriormente uma análise aos resíduos de desgaste (recolhidos por fita adesiva de dupla face) por Difracção de Raios-X, a qual não produziu qualquer resultado, devido à insuficiente quantidade dos mesmos.

Na 3.ª etapa aumentou-se a velocidade (50→100 rpm). Observou-se bom arranque mas de imediato com $\mu \geq 1$. A emissão de ruídos aleatórios, novamente espaçados por 5

minutos, foi cada vez mais intensa, e para $\approx 90\%$ da etapa, com valores de atrito instantâneo $\mu = 2$, ocorreram fortes pancadas por maiores esforços de contacto (adesão/desprendimento e abrasão). Atendendo aos valores finais elevados de atrito, com μ instantâneo acima de 2, a gripagem ocorreria se se prolongasse o ensaio. Para 95% da etapa o ruído passou a ser permanente, revelando estar-se perto da destruição do par. Após desmontagem, verificou-se que as faces de trabalho ficaram irrecuperavelmente danificadas. O coeficiente de desgaste obtido foi de $K_d = 7,47 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$, confirmando o desgaste severo.¹⁶ Por estes factos, conclui-se que este par é incompatível tribologicamente, pelo menos em franco contacto seco.

Tabela 3.6: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/ZA-27.

Etapa	N (kN)	W (rpm)	V (m/s)	t (s)	Σt (h)	L (m)	ΣL (m)	μ médio	$K_d (\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	
									Placa	Pino
1	0,01	50	0,055	300	0,08	18,1	18,1	0,69		
2	0,01	50	0,055	1800	0,58	99,2	117,3	1,16	$7,47 \times 10^{-4}$	*
3	0,01	100	0,110	1800	1,08	203,1	320,4	1,45		

* - Não se verificou perda de massa, com quantificação de ligeiro aumento (por transferência/aderência de material e/ou com eventual formação de óxidos).

Na figura 3.30 mostra-se a evolução do atrito instantâneo da etapa 3. É notório o comportamento oscilatório desta linha, revelando pontos/momentos de esforço mecânico no contacto entre as superfícies. O atrito médio desta etapa foi de 1,45, com um desvio padrão de 0,29.

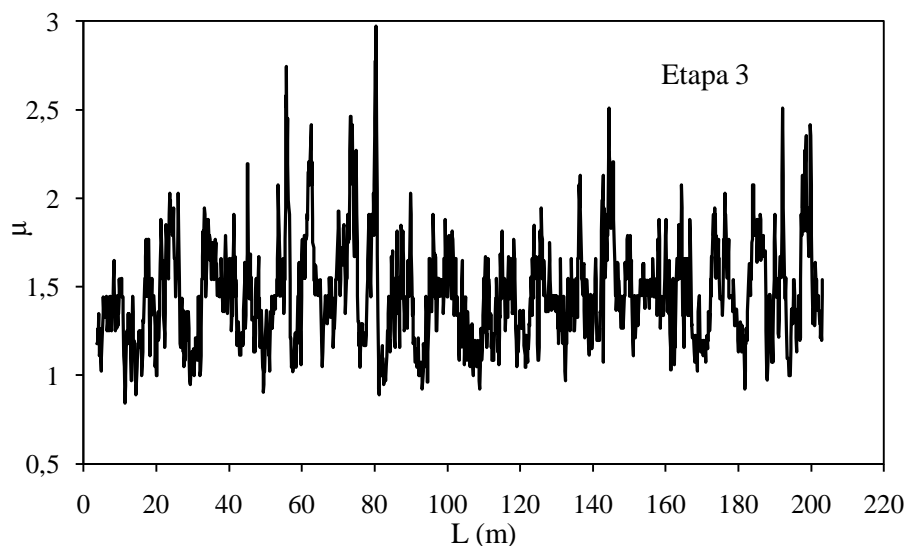


Figura 3.30: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/ZA-27.

O gráfico da figura 3.31 ilustra a evolução do atrito médio ao longo do ensaio. É visível a tendência sempre crescente do atrito médio de etapa para etapa, atingindo valores elevados de atrito.

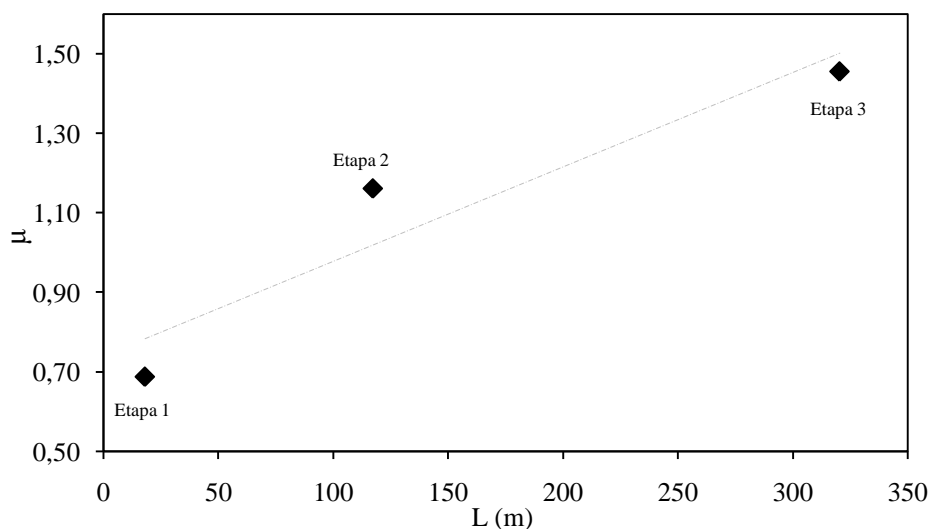


Figura 3.31: Atrito médio em função da distância de deslizamento para o par Aço/ZA-27.

Na figura 3.32 apresentam-se fotomicrografias de SEM da superfície polida da placa ZA-27. A menor ampliação (fig. 3.32.a) podem-se ver as marcas do polimento feitas com lixas de SiC. A maior ampliação (fig 3.32.b) evidenciam-se sulcos finos deixados pelas partículas duras de SiC, tal e qual como observado na placa AMPCO 18 da figura 3.9.

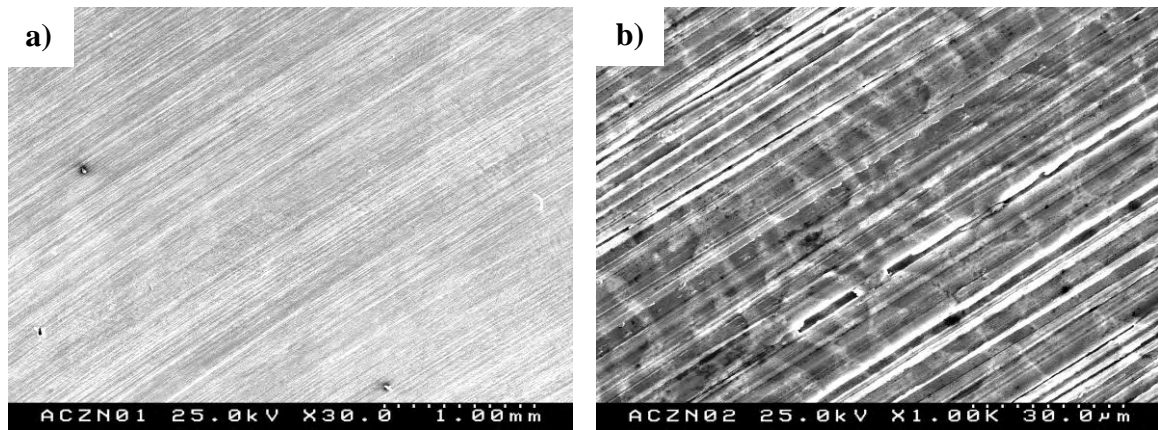


Figura 3.32: Fotomicrografias de SEM da a) zona fora da pista de trabalho e b) uma sua maior ampliação para o par Aço/ZA-27.

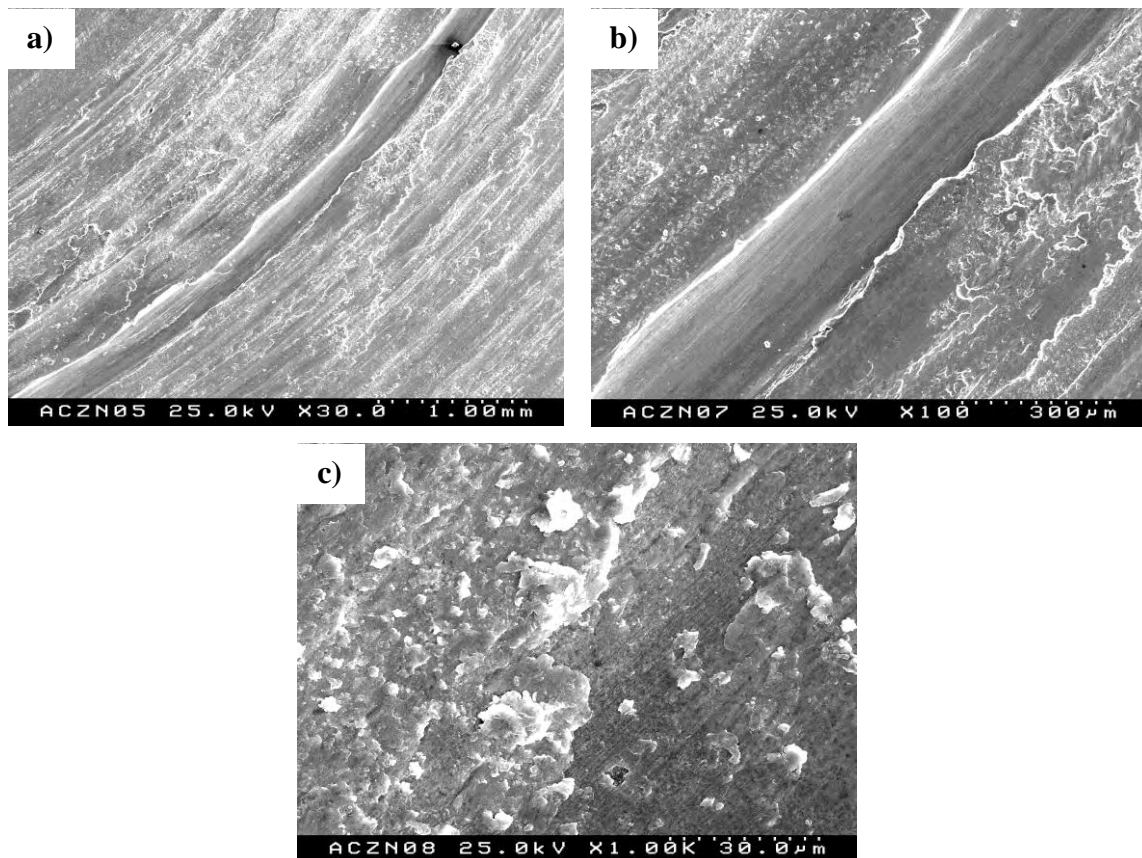


Figura 3.33: Fotomicrografias de SEM da a) pista de trabalho e b) c) zonas de pormenor da pista de trabalho a maiores ampliações para o par Aço/ZA-27.

As fotomicrografias de SEM da figura 3.33 revelam o aspecto final da pista de trabalho. A baixa ampliação (fig. 3.33.a), a pista apresenta-se sulcada em virtude da forte

abrasão causada pelo oponente (2º corpo) e pelas partículas de desgaste (3º corpo). Na figura 3.33.b observa-se em pormenor, um sulco profundo no meio da pista de desgaste. Em regime severo de abrasão, as indentações formam diferentes sulcos com formação de fendas, primeiramente radiais e depois laterais paralelamente à superfície, seguida do arrancamento de material. ⁴⁷ A maior ampliação (fig. 3.33.c), a superfície de desgaste apresenta-se muito deteriorada, denotando elevada rugosidade, fragmentos aleatórios soltos e alguma agregação dos resíduos de desgaste (“empastelamentos”).

A análise de EDS (figura 3.34) efectuada na zona da pista de trabalho não detectou transferência de material do pino para a placa ZA-27. O espectro revela a presença única dos constituintes da placa mãe.

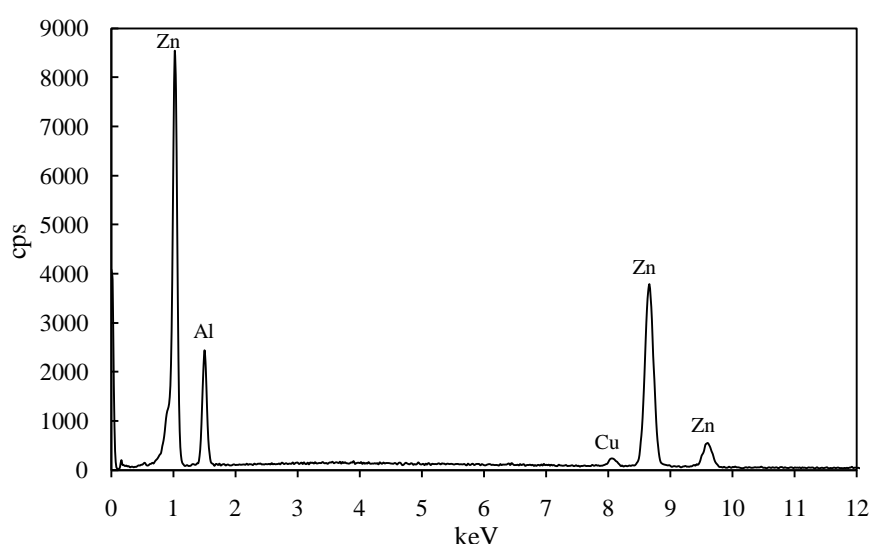


Figura 3.34: Espectro de EDS da zona da pista de desgaste para o par Aço/ZA-27.

Posteriormente, foi efectuada uma análise de EDS às partículas de desgaste da figura 3.33.c, ilustrada pela figura 3.35.

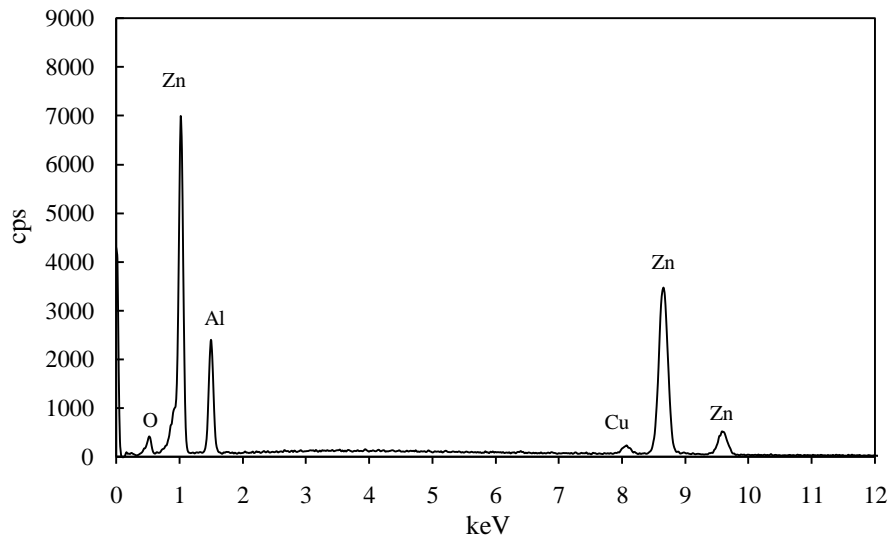


Figura 3.35: Espectro de EDS das partículas de desgaste para o par Aço/ZA-27.

O espectro é idêntico ao anterior (fig. 3.34), mas com a presença de um ligeiro pico de oxigénio. Tal pode revelar uma formação ou aglomerados de partículas de óxidos na pista de desgaste.

Foi igualmente efectuada análise de SEM à face do pino utilizado neste ensaio, figura 3.36.

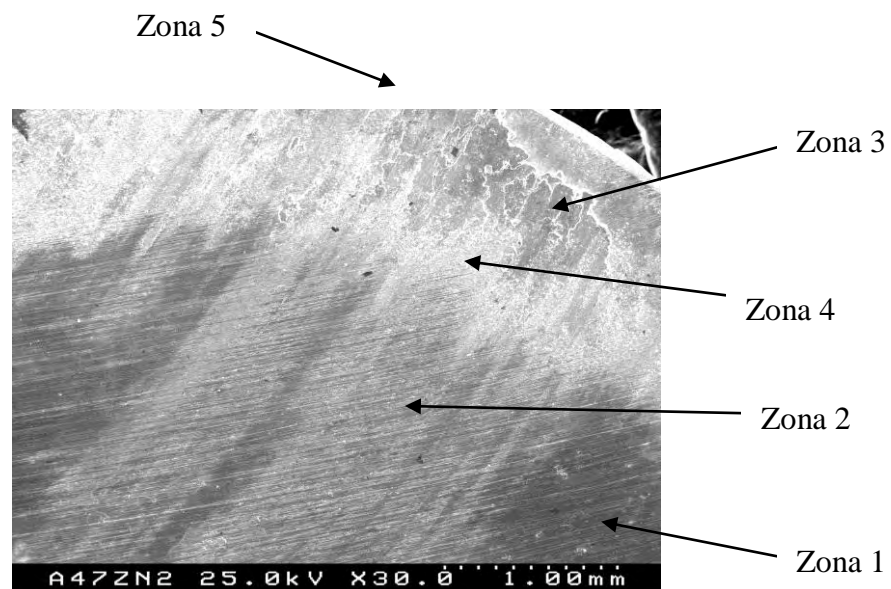


Figura 3.36: Fotomicrografia de SEM da vista geral (e 5 zonas) da face do pino para o par Aço/ZA-27.

A fotomicrografia de SEM da figura 3.36 mostra uma vista geral da face do pino. Como é possível observar, a superfície do pino não efectuou trabalho mecânico de forma uniforme. Isto, no geral e em primordial explicação, tem origem em alguma irregularidade da face do pino após corte, e quando não é possível corrigi-la totalmente por subsequente polimento, ou ainda, quando esse polimento causa alguma ovalização na pequena área transversal da mesma face. A própria severidade dum contacto em deslizamento, comportamento patente neste par, pode também originar ou incrementar este defeito. Desta forma, a análise seguinte será feita por zonas.

Começando a análise pela zona 1 (figura 3.37), zona de menor trabalho e de maior polimento, observa-se uma superfície praticamente intacta, sendo apenas visíveis as marcas do polimento.

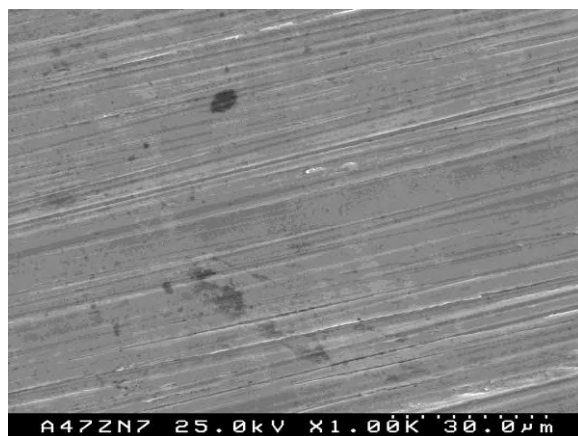


Figura 3.37: Fotomicrografia de SEM referente à zona 1 da face do pino para o par Aço/ZA-27.

A análise de EDS efectuada a esta zona revelou a presença de ferro e dos principais elementos de liga do aço do pino, como mostra a figura 3.38.

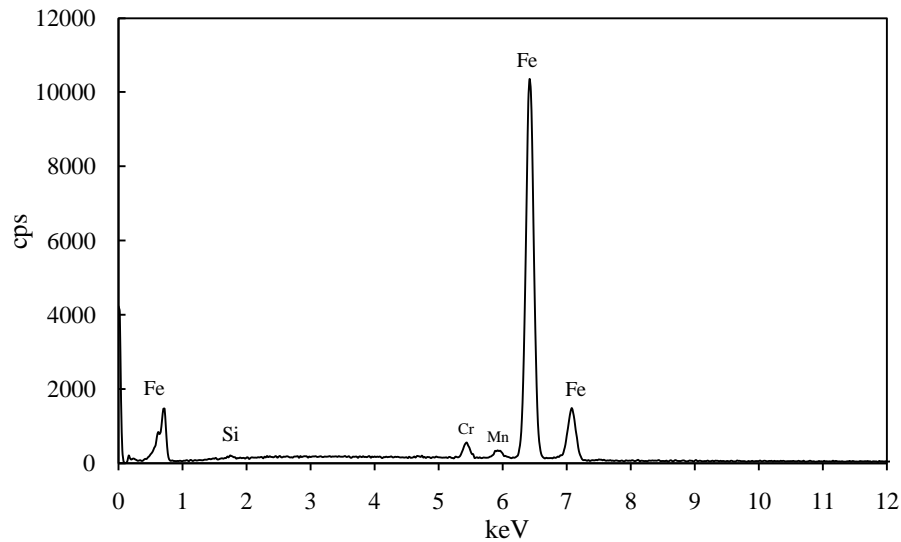


Figura 3.38: Espectro de EDS da zona 1 da face do pino para o par Aço/ZA-27.

A zona 2 mostra claramente que exerceu algum trabalho sobre a placa ZA-27. A maior ampliação, fig. 3.39, observa-se alguma adesão de partículas de desgaste ao pino. Por análise de EDS (figura 3.40) não se detectou a presença de nenhum constituinte da placa ZA-27 na face do pino, mas na quantificação atômica detectou-se a presença de zinco.

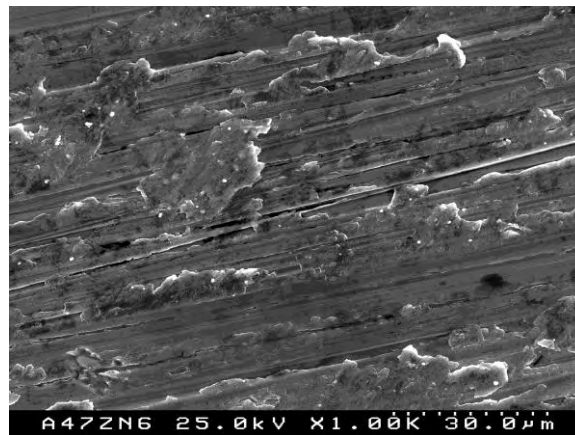


Figura 3.39: Fotomicrografia de SEM referente à zona 2 da face do pino para o par Aço/ZA-27.

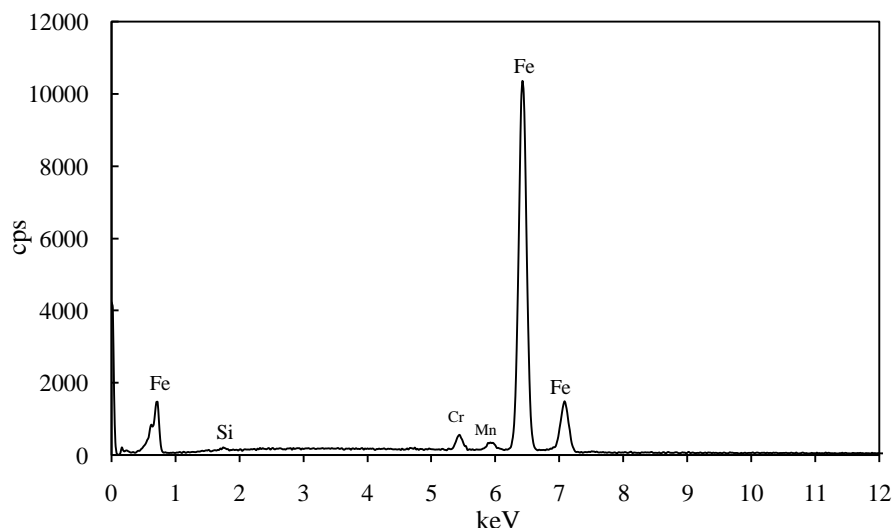


Figura 3.40: Espectro de EDS da zona 2 da face do pino para o par Aço/ZA-27.

As zonas 3 e 4 foram aquelas em que a superfície do pino exerceu maior trabalho como se pode ver pela fotomicrografia da figura 3.36.

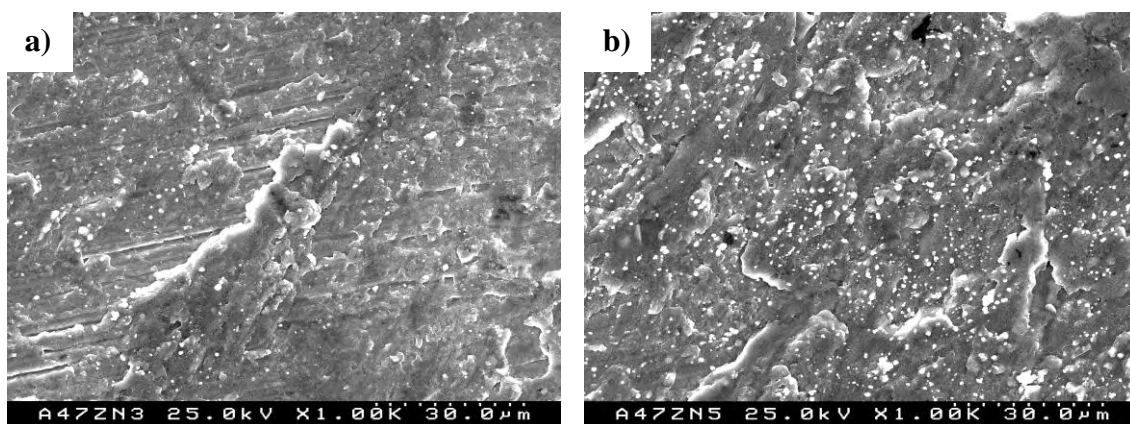


Figura 3.41: Fotomicrografias de SEM a) da zona 3 e b) da zona 4 da face do pino para o par Aço/ZA-27.

Nas fotomicrografias de SEM da figura 3.41, a zona 3 (fig 3.41.a) e a zona 4 (fig 3.41.b) apresentam elevada rugosidade e grandes quantidades de transferência/adesão de material à face do pino. Este facto é comprovado pela análise de EDS feita à zona 3 (figura 3.42), reveladora de grandes quantidades de zinco, alumínio e cobre, elementos que constituem a placa ZA-27. A quantificação obtida (concentração atómica) foi: zinco = 75,10; alumínio = 21,35; cobre = 2,06; ferro = 1,30 e cromo = 0,09. Conclui-se, deste modo, que

ocorreu elevada transferência de material da placa ZA-27, menos dura, para a superfície oponente, mais dura, do pino.

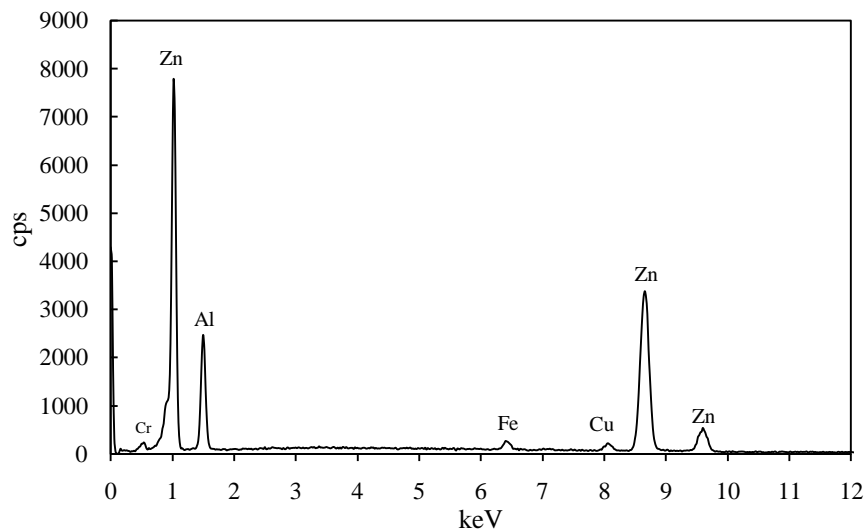


Figura 3.42: Espectro de EDS da zona 3 da face do pino para o par Aço/ZA-27.

Por fim, a zona 5 diz respeito à zona na periferia da face do pino. Pela fotomicrografia de SEM da figura 3.43, observam-se algumas partículas de desgaste da placa ZA-27 aderidas ao pino, embora em menor quantidade relativamente às zonas 3 e 4. A análise EDS (figura 3.44) comprova esse facto. O espectro mostra a presença dos componentes constituintes da placa de ZA-27 mas com menor intensidade do que na zona 3, com aumento dos picos relativos ao ferro e aos restantes elementos de liga do aço do pino. A quantificação (concentração atómica) foi: zinco = 29,50; alumínio = 9,89; cobre = 0,81; ferro = 56,95 e crómio = 1,45.

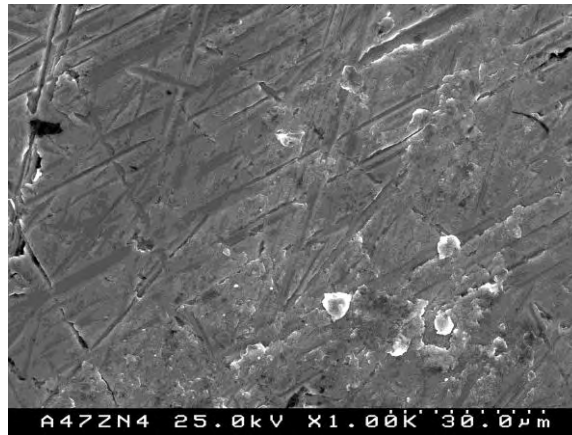


Figura 3.43: Fotomicrografia de SEM da zona 5 da face do pino para o par Aço/ZA-27.

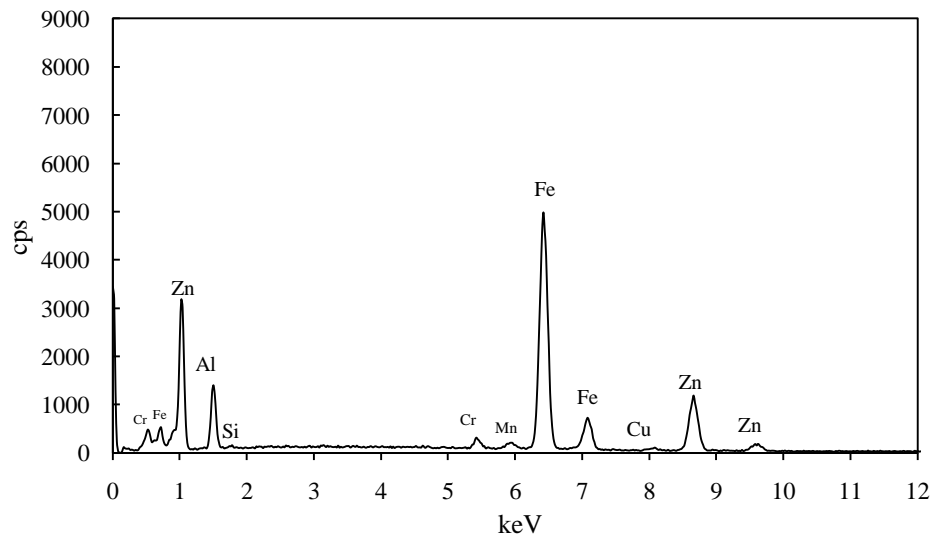


Figura 3.44: Espectro de EDS da zona 5 da face do pino para o par Aço/ZA-27.

Estes resultados morfológicos, reforçam a conclusão de que este par não é compatível tribologicamente. A liga de zinco-alumínio, devido à sua menor dureza e inferiores propriedades ou capacidades mecânicas em geral, foi facilmente abradida pelo material mais duro (aço), provocando abrasão a dois corpos.

A dureza, como uma propriedade plástica, é tida em conta no desgaste de metais dúcteis, já que este é obtido após um grande fluxo plástico. Existem boas razões para correlacionar a influência da dureza no desgaste.³⁹

A abrasão efectiva envolve microcorte, um modo efectivo de remoção mecânica de material. O corte, por sua vez, necessita de penetração no material abradido, sendo que materiais mais duros resistem mais a essa penetração.³⁹

O constituinte maioritário desta liga é o zinco. Analisando o mapa da figura 1.2, observa-se que o zinco possui solubilidade líquida total e solubilidade sólida maior do que 1% em ferro, sugerindo um grau de adesão elevado. Isto é comprovado pelos resultados obtidos no ensaio tribológico pino/placa, que demonstra a fraca prestação tribológica, quer ao nível do forte desgaste, que, neste par, nem sequer é compensado por um mínimo de período de funcionamento estável e valores elevados de atrito. Pares com estas respostas denotam insuficiência para, eventualmente, até nem suportarem pequenos instantes de falha de um sistema de lubrificação, ou o arranque/paragem de mecanismos.

Por último refira-se que a validação das conclusões gerais, e sobretudo a legitimação do comportamento do ensaio tribológico deste par, deveria ou terá de vir a passar no futuro, por uma repetição deste ensaio e dos seus procedimentos. Tanto mais que surge como não explicado o facto da face do pino se mostrar preservada no seu interior, apenas com trabalho e alteração de rugosidade por toda a orla exterior. Nos meios mecânicos de prévia preparação e polimento desta face seria improvável, para não dizer impossível, a geração de uma abobada no centro do pino e invertida para o interior da sua massa. Restaria corroborar (e explicar) a causa do trabalho, aglomeração, etc., apenas nos bordos do pino.

3.4.5. Par Tribológico Aço/Metal Duro (WC-Co)

Neste ensaio pretendeu-se avaliar a compatibilidade tribológica do par referido. Os resultados estão descritos na tabela 3.7.

O ensaio começou com a seguinte condição: 0,01 kN; 50 rpm e 300 s. Logo desde início, notou-se contínua emissão de ruído, agudo e de alta amplitude, com $\mu \geq 1$. Aproximadamente a 45% da etapa, a máquina bloqueou automaticamente, bloqueio esse não originado por vibração mas por esforço contínuo de atrito com elevado ruído fino associado.

A etapa n.º 2 foi uma repetição da 1.ª etapa em parâmetros e em comportamento, sendo, no entanto, completada.

Na etapa n.º 3 mantiveram-se as condições, variando-se apenas o tempo de ensaio (300→1800 s). De novo observou-se elevado ruído contínuo e fino, e com elevado valor do coeficiente de atrito, $\mu \geq 1,5$. A máquina bloqueou automaticamente para aproximadamente 30% da etapa. A 4.ª etapa foi uma repetição da 3.ª, observando-se bloqueio automático logo no arranque.

Na etapa n.º 5 aumentou-se a velocidade de 50 para 100 rpm. Continuou-se a ter elevado ruído contínuo fino, numa emissão acústica semelhante à maquinação a seco, com elevado atrito e sempre oscilante. A máquina abortou para 18% da etapa.

Na 6.ª e última etapa, a condição de teste foi idêntica à etapa anterior. Observou-se igual comportamento, ocorrendo bloqueio automático a 10% da mesma.

De referir que no final de cada etapa, foi notório algum (apesar de ligeiro) aquecimento da amostra de metal duro, não havendo destruição ou danos perceptíveis.

Tabela 3.7: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/Metal Duro.

Etapa	N (kN)	W(rpm)	V (m/s)	t (s)	Σt (h)	L (m)	ΣL (m)	μ médio	K_d (mm ³ .N ⁻¹ .m ⁻¹)	
									Placa	Pino
1	0,01	50	0,085	300	0,08	13,6	13,6	1,26		
2	0,01	50	0,085	300	0,17	27,9	41,5	1,61		
3	0,01	50	0,085	1800	0,67	51,3	92,8	1,56	*	*
4	0,01	50	0,085	1800	1,17	-	-	-		
5	0,01	100	0,171	1800	1,67	63,0	155,8	1,44		
6	0,01	100	0,171	1800	2,17	37,9	193,7	1,58		

* - Não se verificou perda de massa, mesmo em elevada precisão de quantificação (10⁻⁵ g).

- Paragem automática do tribómetro.

Na figura 3.45 está representado o gráfico do μ instantâneo em função da distância de deslizamento, referente à etapa 5. É visível a oscilação dos picos de atrito instantâneo e os elevados valores, alguns acima de 2. O atrito médio desta etapa foi de 1,44, com um desvio padrão de 0,22. Na figura 3.46 apresenta-se o gráfico referente ao atrito médio. A partir da etapa n.º 2 e até ao final do ensaio, o atrito foi mais uniforme, situando-se num valor médio de 1,5 no conjunto das referidas etapas. A elevada dureza dos materiais proporciona forte abrasão mútua, fazendo com que este par seja incompatível tribologicamente, com elevados valores de atrito. Como se infere das referências bibliográficas, a rugosidade também influencia o atrito e a superfície mais lisa do metal duro poderá ter influenciado os valores de atrito, com o aumento da adesão entre os dois materiais.

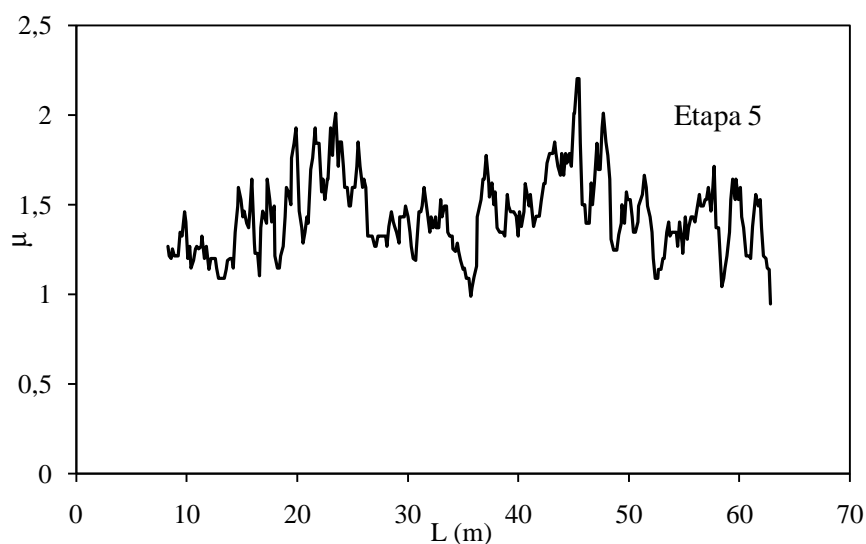


Figura 3.45: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/Metal Duro.

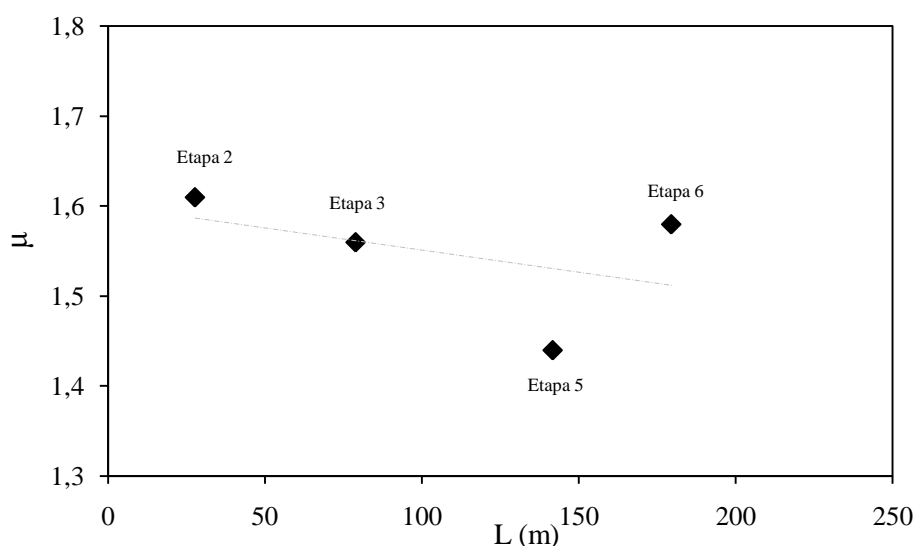


Figura 3.46: Atrito médio em função da distância de deslizamento para o par Aço/Metal Duro.

3.4.6. Par Tribológico Aço/Ferro Fundido Cinzento (FFC)

Igualmente neste par, a verificação da compatibilidade tribológica era o objectivo, sobretudo no sentido de ver a eventual acção lubrificante da grafite lamelar do ferro fundido.

Os parâmetros geométricos e os de ensaio foram idênticos aos do par aço/metal duro. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3.8.

Na etapa inicial (0,01 kN, 50 rpm e 300 s) observou-se bom arranque do par mas logo com ruído e elevado valor de atrito, com $\mu > 1$ ($\mu \approx 1,4$ a $1,5$).

O ruído notado era contínuo, característico de um misto abrasão/adesão, começando a formar-se resíduos.

Na etapa n.º 2 aumentou-se o patamar para 1800 s, observando-se um comportamento igual à 1.ª etapa. A etapa n.º 3 consistiu num aumento de 1800 s para 3600 s no tempo de duração. Após arranque, o ruído observado era elevado, bem como os valores de atrito instantâneo. A 3% da etapa, a máquina abortou por vibração com fortes picos de adesão/abrasão. Na etapa n.º 4 aumentou-se a velocidade de 50 para 100 rpm. Observou-se novamente elevado ruído, com valores de coeficiente de atrito instantâneo superiores a 2 e com certos picos, quer superiores, quer inferiores. A 5% da etapa ocorreu bloqueio da máquina por adesão/abrasão. Procedeu-se à recolha dos resíduos e à finalização do teste, sem funcionamento capaz em deslizamento seco, ou seja, sendo o par incompatível do ponto de vista tribológico na ausência de lubrificante.

Tabela 3.8: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/FFC.

Etapa	N (kN)	W (rpm)	V (m/s)	t (s)	Σt (h)	L (m)	ΣL (m)	μ médio	K_d (mm ³ .N ⁻¹ .m ⁻¹)	
									Placa	Pino
1	0,01	50	0,085	300	0,08	28,8	13,6	1,53		
2	0,01	50	0,085	1800	0,58	155,4	169,0	1,49	*	*
3	0,01	50	0,085	3600	1,58	8,3	177,3	1,42		
4	0,01	100	0,171	3600	2,58	35,1	212,4	1,66		

* - Não se verificou perda de massa, mesmo em elevada precisão de quantificação (10^{-5} g).

Na figura 3.47 está representado o gráfico de μ instantâneo vs L para este ensaio para a etapa n.º 2.

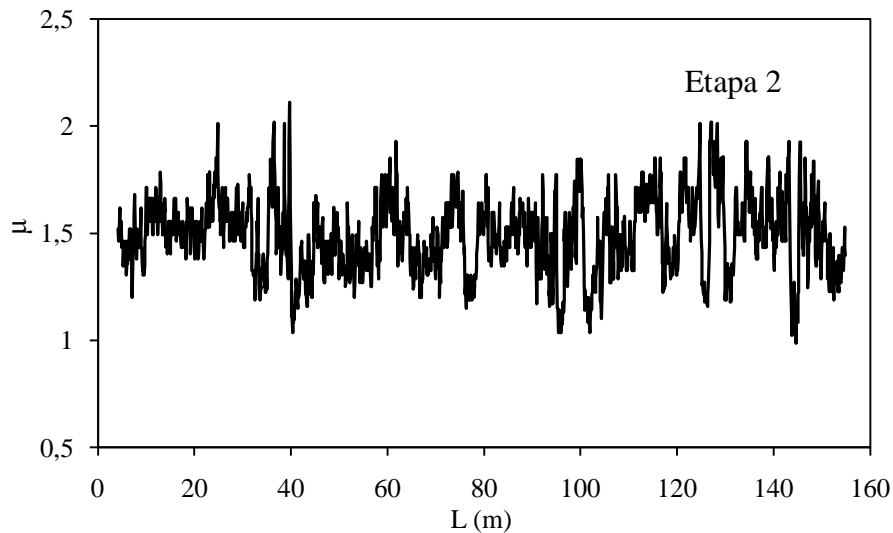


Figura 3.47: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/FFC.

Pela figura 3.47, observa-se a elevada oscilação nos valores do atrito instantâneo. O atrito médio registrado para esta etapa foi de 1,49, com um desvio padrão de 0,18.

Na figura 3.48 está representado o μ médio vs L . Observa-se uma tendência para o valor médio de 1,50 ao longo do ensaio tribológico. Observa-se também um incremento no valor de atrito quando a velocidade passa de 50 rpm da etapa n.º 3 para 100 rpm na 4.ª etapa, mantendo-se constante a carga e o tempo de ensaio. Isto mostra alguma influência da velocidade de deslizamento no atrito.

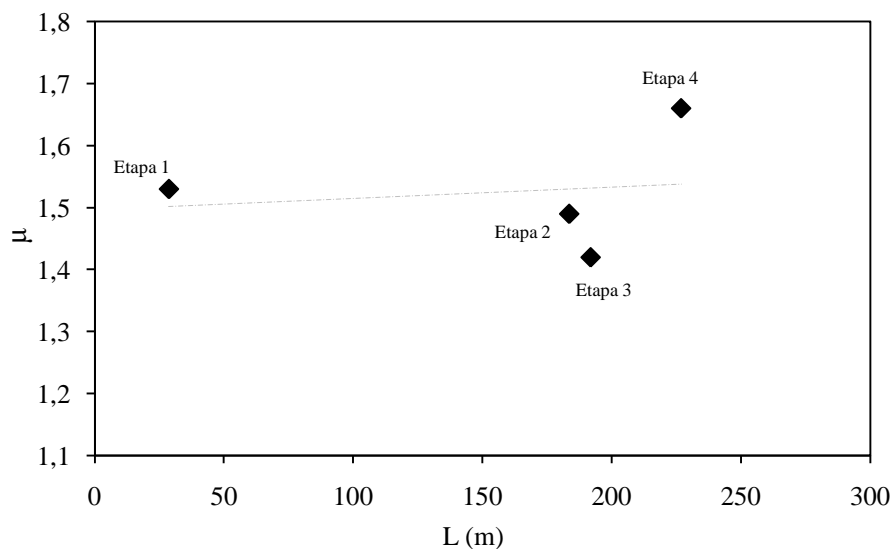


Figura 3.48: Atrito médio em função da distância de deslizamento para o par Aço/FFC.

Semelhante ao que aconteceu no ensaio anterior, a maior dureza dos dois materiais poderá estar na origem dos elevados valores de atrito registados, tornando este par incompatível tribologicamente. De referir que não se observou influência do poder auto-lubrificante da grafite nos valores de atrito.

3.4.7. Par Tribológico Aço/Latão de Alta Resistência

Este ensaio tinha como objectivo testar o latão de alta resistência, aqui como derradeiro ensaio de um eventual material capaz de substituir o bronze de alumínio.

A figura 3.49 apresenta o aspecto da amostra de latão de alta resistência e pino de aço, depois do ensaio tribológico.



Figura 3.49: Placa de latão e contra pino de aço após ensaio tribológico.

Na tabela 3.9 encontram-se os resultados obtidos.

Tabela 3.9: Resultados do ensaio tribológico para o par pino/placa Aço/Latão de Alta Resistência.

Etapa	N (kN)	W (rpm)	V (m/s)	t (s)	Σt (h)	L (m)	ΣL (m)	μ médio	K_d (mm ³ N ⁻¹ m ⁻¹)	
									Placa	Pino
1	0,01	100	0,171	300	0,08	55,0	55	2,54	*	*
2	0,01	100	0,171	300	0,08	-	-	-		

*Cálculo sem efeito prático.

Na etapa inicial observou-se bom arranque, notando-se desde logo significativo atrito dinâmico, talvez não tão elevado como a máquina inicialmente indicava ($\approx 2,3$, e depois muito acima), mas certamente ≥ 1 . Este facto poderia dever-se a possível erro de aquisição, por descalibração da célula de carga. Aproximadamente a meio da etapa, começou a observar-se aumento considerável do μ e o aparecimento de alguns ruídos aleatórios. Quase no final do ensaio (93% da etapa), ocorreu bloqueio automático da máquina.

Na figura 3.50 apresenta-se o gráfico de μ instantâneo, referente à etapa 1.

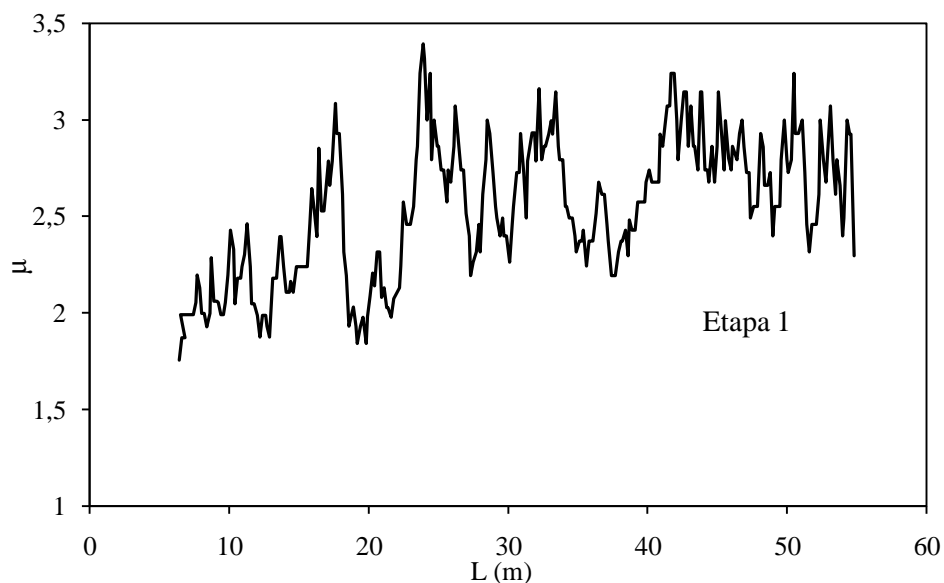


Figura 3.50: Atrito instantâneo em função da distância de deslizamento para o par Aço/Latão de alta resistência.

Na etapa n.º 2, e depois da confirmação da boa calibração do equipamento, induziu-se a mesma condição (0,01 kN, 100 rpm, 300 s). Denotou-se elevado μ com crescente ruído. Para 6% da etapa, ocorreu ruído/adesão contínua e deu-se bloqueio e gripagem do par.

Em franco contacto de deslizamento seco, este par é incompatível tribologicamente devido essencialmente à incompatibilidade metalúrgica dos seus elementos.

Devido à curta duração do ensaio (falta de compatibilidade, não existindo trabalho efectivo e capaz), a determinação das massas após o ensaio não se realizou (para o cálculo do coeficiente de desgaste).

Com a colocação de um novo pino e a mudança para uma nova pista, o ensaio decorreu sempre de forma aleatório e pouco reproduzível. Os mecanismos de atrito e desgaste, e o funcionamento em geral, são muito aleatórios, desde logo denunciado o surgimento duma fase de gripagem, que ao iniciar-se, pode manifestar-se de forma não repentina ou até mesmo

muito abrupta. O nível de danos numa dada etapa pode ser (ou será mesmo) diferente do seu grau noutra etapa em iguais condições. Certo é que os coeficientes de atrito e de desgaste seriam altos se fosse prolongado o tipo de ensaio.

De realçar que neste par bem como nos dois pares anteriores ensaiados, não se procedeu às análises de SEM e EDS por falta de tempo no plano/prolongamento do trabalho.

3.4.8. Comparação Entre os Diferentes Tipos de Materiais Constituintes dos Pares Tribológicos Ensaiaados

Na tabela 3.10 estão reunidos os resultados obtidos com os diferentes materiais testados, numa etapa de ensaio considerada representativa. Na figura 3.51 apresenta-se a evolução comparativa de μ instantâneo vs L.

Relativamente aos valores de μ , e comparando com alguma literatura recolhida e apresentada na tabela 1.1, os valores obtidos são díspares. A principal razão para esta diferença reside nas diferentes condições de trabalho (quer no tipo de contacto, quer nas cargas e velocidades), natureza química e propriedades mecânicas dos materiais em contacto.

Tabela 3.10. Resultados dos ensaios tribológicos pino/placa efectuados com os diferentes materiais, em contacto de deslizamento seco, contra aço.

Material	Etapa Nº	Condição (de Ensaio/Etapa)	L (m)	μ médio (Desvio Padrão)	K_d final ($\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$)
AMPCO 18 (rectificado sem polimento)	4	0,03kN/100rpm/1800s	204,6	0,83 (0,07)	$2,39 \times 10^{-4}$
AMPCO 18 (rectificado com polimento)	9	0,04kN/100rpm/1800s	144,7	0,59 (0,05)	$2,82 \times 10^{-4}$
AMPCO 608 Grafitado	8	0,07kN/100rpm/1800s	369,2	0,09 (0,01)	$3,86 \times 10^{-5}$
ZA-27	3	0,01kN/100rpm/1800s	203,1	1,45 (0,29)	$7,47 \times 10^{-4}$
Metal Duro	5	0,01kN/100rpm/1800s	63	1,44 (0,22)	-
Ferro Fundido Cinzento	2	0,01kN/50rpm/1800s	154,9	1,49 (0,18)	-
Latão de Alta Resistência	1	0,01kN/100rpm/300s	55	2,54 (0,36)	-

Relacionando os valores da tabela 3.10 e o gráfico da figura 3.51, verifica-se que o material AMPCO 608 grafitado apresenta o menor valor do coeficiente de atrito, $\mu = 0,09$,

enquanto que o maior valor se verifica para o latão de alta resistência, $\mu = 2,54$, sendo possível observar a diferença entre a oscilação dos picos de atrito instantâneo registado para os diferentes materiais: a oscilação é menor para a classe de materiais AMPCO testados, relativamente aos restantes, com maiores esforços e danos mecânicos, menor estabilidade e pior comportamento tribológico geral por parte destes últimos.

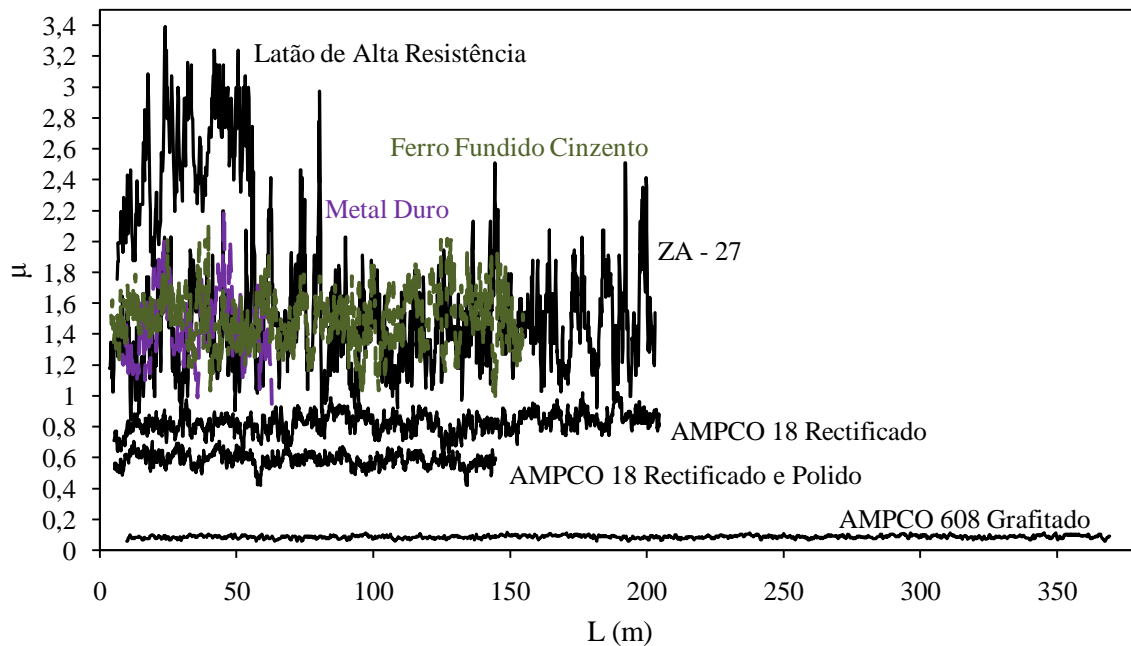


Figura 3.51: Evolução comparativa do coeficiente de atrito instantâneo entre os vários materiais testados.

Os coeficientes de desgaste calculados situaram-se entre o desgaste moderado ($\approx 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$) e o severo ($> 10^{-4} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$). O material ZA-27 apresentou o maior desgaste. O menor coeficiente de desgaste foi calculado para o AMPCO 608 Grafitado, sofrendo desgaste considerado moderado.

4. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

No presente trabalho investigou-se o comportamento tribológico de diversos materiais com o objectivo de caracterizar e apresentar soluções alternativas, também caracterizadas, de substituição de bronzes de alumínio, AMPCO 18 e 608, materiais presentemente utilizados em corredeiras de moldes de uma unidade industrial. Para tal, foram testados vários materiais alternativos: uma liga de zinco-alumínio, um metal duro, um ferro fundido cinzento e um latão de alta resistência, utilizando o aço das guias dos moldes como contra-corpo. Foram avaliados o coeficiente de atrito e o coeficiente de desgaste, e foi feita a análise morfológica das superfícies de trabalho para cada par tribológico.

Inicialmente foram testados os bronzes já utilizados nas corredeiras dos moldes da empresa, para que depois se pudesse comparar a resposta tribológica com os outros materiais.

Os materiais ensaiados, liga de zinco-alumínio, metal duro, ferro fundido cinzento e latão de alta resistência, como possíveis alternativas para as corredeiras, apresentaram um comportamento tribológico seco catastrófico, com coeficientes de atrito muito superiores aos calculados para os referidos materiais já utilizados nas corredeiras, concluindo-se pela sua incompatibilidade tribológica contra oponentes de aço. O AMPCO 18 rectificado e polido, sendo a referência utilizada como corredeira no molde, apresentou um coeficiente de atrito de 0,59. A liga de zinco-alumínio apresentou um coeficiente de atrito de 1,45, o metal duro, 1,44, o ferro fundido cinzento, 1,49 e o latão de alta resistência de 2,54.

Quanto à classe dos AMPCO, concluiu-se pela vantagem do polimento efectuado, em termos do coeficiente de atrito: o AMPCO apenas rectificado apresentou um coeficiente de atrito de 0,83. O AMPCO 608, um bronze de alumínio impregnado com grafite, sensivelmente mais caro e utilizado apenas sob certos requisitos fabris, apresentou um excelente valor para o coeficiente de atrito em contacto não lubrificado, de $\approx 0,09$, por efeito de auto-lubrificação pela grafite na superfície de deslizamento.

Quanto aos coeficientes de desgaste, o AMPCO 18 rectificado sem polimento, o AMPCO 18 rectificado e polido e a ZA-27 apresentaram desgaste acima de $10^{-4} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$, com um valor superior para a liga de zinco-alumínio. O AMPCO 608 grafitado apresentou o menor desgaste, na ordem de $\approx 10^{-5} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$, considerado moderado.

A análise de SEM das superfícies de desgaste dos pares envolvendo AMPCO 18 e ZA-27, revelou sulcos em resultado da abrasão da superfície oponente (2º corpo) e das partículas

de desgaste (3º corpo). Verificou-se também estar presente o mecanismo de transferência com aderência (ditos “empastelamentos”) de material de desgaste para as superfícies oponentes ao pino de aço, e um discreto mecanismo de desgaste adesivo, porventura finamente disperso por não existirem sinais extensivamente evidentes de aderências, deformações plásticas ou arrancamentos. Estes efeitos adesivos dão-se sem formação de novos compostos, não sendo também encontrados sinais fortes de formações de óxidos nas faces de trabalho metálicas estudadas, pelo menos dentro das condições dos testes realizados.

Apesar de na respectivo aplicação industrial os conjuntos guia/corrediça dos moldes operarem com lubrificação por deposição de óleos ou de massas lubrificantes, optou-se pela prévia realização de ensaios a seco, estes pioneiros nestes materiais para aquelas condições e tipos de ensaio. Assim, além de se proceder à investigação tribológica primária, está-se a verificar a resposta de cada material em caso de maior falha do lubrificante, ou em momentos de paragem/arranque com efectivo contacto directo dos componentes em oposição.

Como futuro trabalho, propõe-se uma pesquisa mais exaustiva de materiais capazes de, efectiva e capazmente, substituírem o bronze de alumínio (AMPCO) utilizado nas corrediças, no sentido da redução de custos na produção e sem perda de capacidades de operação. A caracterização tribológica a seco destes materiais visou estudar o comportamento destes na ausência de lubrificação, para se perceber a interacção das superfícies oponentes. Outra tarefa será investigar o comportamento tribológico dos pares em contacto fechado e o uso de lubrificantes, bem como o estudo dos regimes de lubrificação. Como materiais alternativos a testar, a premissa de investigação para utilização naquela indústria de moldes de outras ligas metálicas, os materiais ditos mais tradicionais (maior disponibilidade, menor preço e melhor maquinabilidade) parecem pouco promissores, sobretudo a seco. Restam múltiplos novos materiais, sejam poliméricos, cerâmicos especiais ou até novos compósitos, como compósitos carbono-carbono uni- ou bi-direcionais e de alta resistência.

BIBLIOGRAFIA

- ¹ <http://www.simoldes.com>, 2009/02/11
- ² J. Gomes, Tese de Doutorado, Universidade do Minho (1997).
- ³ Revista Ciência & Tecnologia dos Materiais, Sociedade Portuguesa de Materiais, Vol. 18 – N.º 1/2 Janeiro-Junho, pág. 63 (2006).
- ⁴ P. Dasic, F. Franek, E. Assenova, M. Radovanovic, Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 55 287-291 (2003).
- ⁵ J. M. Carrapichano, Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro (2002).
- ⁶ K. C. Ludema, Friction, Modern Tribology Handbook, Vol. 1, CRC Press (2001).
- ⁷ T. A. Stolarski, Tribology in Machine Design, Butterworth-Heinemann (1990).
- ⁸ R. L. Stoeterau, Tribologia (2004).
- ⁹ G. W. Stachowiak e A. W. Batchelor, Engineering Tribology, 2. Ed., Butterworth-Heinemann (2001).
- ¹⁰ M. J. Neale, Tribology Handbook, 2. Ed., Butterworth-Heinemann (1997).
- ¹¹ B.K. Prasad, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 28A, March-809 (1997).
- ¹² J. P. Pandey e B. K. Prasad, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 29A, April-1245 (1998).
- ¹³ B.K. Prasad, Tribology Letters, Vol. 25, No. 2, February 2007.
- ¹⁴ B.K. Prasad, Wear 257, 110–123 (2004).
- ¹⁵ A.A. Seireg, Friction and Lubrication in Mechanical Design, Marcel Dekker, Inc. (1998).
- ¹⁶ K. Kato e K. Adachi, Wear Mechanisms, Modern Tribology Handbook, Vol. 1, CRC Press (2001).
- ¹⁷ J. Larsen-Basse, ASM Handbook, Vol. 18 - Friction, Lubrication and Wear Technology, (1992).
- ¹⁸ K. Kato e K. Adachi, Metals and Ceramics, Modern Tribology Handbook, Vol. 2, CRC Press (2001).
- ¹⁹ Copper Development Association, N.º 86 (1989).
- ²⁰ A. Silva, “Materiais II”, Instituto Superior Técnico (2000).
- ²¹ M. Yasar e Y. Altunpak, Materials and Design 30, 878–884 (2009).

- ²² W. S. Li, Z. P. Wang, Y. Lu, Y. H. Jin, L. H. Yuan, F. Wang, *Wear* 261, 155-163 (2006).
- ²³ Y. Li, T. L. Ngai, W. Xia, *Wear* 197, 130-136 (1996).
- ²⁴ Z. Shi, A. Bloyce, Y. Sun, T. Bell, *Wear* 198, 300-306 (1996).
- ²⁵ A. V. Seabra, *Metalurgia Geral*, Volume II, 3.^a Ed. (2002).
- ²⁶ Z. Shi, A. Bloyce, Y. Sun, T. Bell, *Wear* 193, 235-241 (1996).
- ²⁷ B.K. Prasad, *Wear* 254, 35-46 (2003).
- ²⁸ F. Akhlaghi, A. Zare-Bidaki, *Wear* 266, 37-45 (2009).
- ²⁹ Jun-hong Jia, Jian-min Chen, Hui-di Zhou, Jing-bo Wang, H. Zhou, *Tribology International* 37, 423-429 (2004).
- ³⁰ J. P. Pandey e B. K. Prasad, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 29A, April-1245 (1998).
- ³¹ M.T. Jovanovic, I. Bobic, B. Djuric, N. Grahovac, N. Ilic, *Tribology Letters*, Vol. 25, No. 3, March 2007.
- ³² C. R. Brooks, *Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio 44073 (1982).
- ³³ G. Purcek, T. Savaskan, T. Kucukomeroglu, S. Murphy, *Wear* 252, 894-901 (2002).
- ³⁴ B. K. Prasad, A. H. Yegneswara, A. K. Patwardhan, *Journal of Materials Science* 32, 1169 – 1175 (1997).
- ³⁵ A.G. Silva, W.D. Shubert, B. Lux, *Materials Research*, Vol. 4, No. 2, 59-62 (2001).
- ³⁶ Apontamentos “Ligas Ferrosas”, *Engenharia Metalúrgica e de Materiais*, FEUP (2000).
- ³⁷ M. Amirat, H. Zaidi, J. Frene, *J. Engineering Tribology*, Vol. 222, Part J (2008).
- ³⁸ M. Amirat, H. Zaidi, A. Djamai, D. Necib, D. Eyidi, *Wear* 267, 433-440 (2009).
- ³⁹ E. Feyzullahoglu, A. Zeren, M. Zeren, *Materials and Design* 29, 714-720 (2008).
- ⁴⁰ H. Minivan, H. Cimenoglu, E.S. Kayali, *Wear* 254, 532-537 (2003).
- ⁴¹ <http://www.ampcometal.com>, 2009/02/12.
- ⁴² <http://www.zincaloy.com>, 2009/04/16.
- ⁴³ <http://www.universalafir.pt>, 2009/06/14.
- ⁴⁴ <http://www.ramada.pt> - Catálogo Electrónico, 2009/02/13.
- ⁴⁵ M. A. Tomé, *Tese de Mestrado*, Universidade de Aveiro (2005).
- ⁴⁶ ASTM G99-95^a, *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus* (1997).
- ⁴⁷ J. L. Basse, *Wear* 76, 114-119 (1991).